

Bernd Nusser

## Flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen

Systemanalysen und neue Ansätze zur Planung hygrisch robuster flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen unter Beachtung konvektiver Feuchteinträge und temporärer Beschattungssituationen

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK

BAND 10

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer  
Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser



**Universität Stuttgart**  
Lehrstuhl für Bauphysik



Technische Universität München  
Lehrstuhl für Bauphysik

**FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK**

**BAND 10**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer  
Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Bernd Nusser

**Flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen**

Systemanalysen und neue Ansätze zur Planung hygrisch robuster flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen unter Beachtung konvektiver Feuchteinträge und temporärer Beschattungssituationen

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart  
Telefon 07 11 9 70-00  
Telefax 07 11 9 70-33 95  
E-Mail [info@ibp.fraunhofer.de](mailto:info@ibp.fraunhofer.de)  
URL [www.ibp.fraunhofer.de](http://www.ibp.fraunhofer.de)

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISSN: 1869-5124

ISBN: 978-3-8396-0414-4

**AT - UBTUW**

Zugl.: Wien, TU, Diss., 2012

Druck: Mediendienstleistungen des  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2012

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 07 11 9 70-25 00  
Telefax 07 11 9 70-25 08  
E-Mail [verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de)  
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Dissertation

# **Flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen**

Systemanalysen und neue Ansätze zur Planung hygrysch robuster  
flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen unter Beachtung  
konvektiver Feuchteinträge und temporärer  
Beschattungssituationen

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar

E206 – Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz  
Institut für Hochbau und Technologie

eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Nusser M.Eng.

E0827878

Wien, im März 2012



*„Fürchte dich nicht davor langsam zu gehen, fürchte dich davor stehen zu bleiben.“*

*(Chinesische Weisheit)*



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Bauphysik und Geschossbau bei der Holzforschung Austria. Initiiert wurde das zugrundeliegende FFG-Forschungsprojekt „Innovative flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen“ von Dipl.-Ing. Dr. Martin Teibinger. Für die zahllosen, gewinnbringenden fachlichen Diskussionen, die mir zugestandene wissenschaftliche Freiheit und seinem Entgegenkommen bei vielen meiner Belange, möchte ich ihm herzlich danken.

Mein ausgesprochener Dank gilt auch Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar für die motivierende, inspirierende und kollegiale Betreuung bei meiner Dissertation. Unsere vielen fachlichen Gespräche haben mein bauphysikalisches Denken und somit die Ergebnisse dieser Arbeit stark geprägt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Klaus Sedlbauer, Ordinarius des Lehrstuhls für Bauphysik an der Universität Stuttgart, danke ich ebenfalls für die Bereitschaft diese Dissertation zu begutachten.

Ich möchte abschließend meinen Kollegen bei der Holzforschung Austria und den Mitarbeitern des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU-Wien für ihre stete Diskussionsbereitschaft und das sehr angenehme Arbeitsklima danken.



## Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Feuchtehaushalt von flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen unter variierenden Einflussfaktoren experimentell und simulationsbasiert analysiert. Es werden ebenfalls neue wissenschaftliche Methoden entwickelt, welche es ermöglichen, im Planungsprozess schnell die geeignete Dachkonstruktion zu finden.

Im ersten Teil der Arbeit werden hierfür zehn verschiedene hölzerne Flachdachkonstruktionen, bestehend aus Foliendächern, Gründächern und metallgedeckten Dächern im Realmaßstab untersucht. Die Freilandversuche erfolgen unter besonnenen sowie bei sechs Aufbauten zusätzlich unter Vollzeit beschatteten Randbedingungen. Anhand der Messdaten werden die Einflussfaktoren auf den Feuchtehaushalt der verschiedenen Dachkonstruktionen ermittelt. Es wird messtechnisch nachgewiesen, dass:

- I. Beschattungen sich negativ auf den Feuchtehaushalt der Dächer auswirken
- II. ein Gründach einen ähnlichen Effekt wie eine dauerhafte Beschattung hat
- III. die untersuchten metallgedeckten Dächer sich hygrisch am günstigsten verhalten
- IV. durch die Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse (FADAB) im Vergleich zu einer PE-Folie mit  $s_d > 100$  m eine deutlich stärkere Rücktrocknung von Feuchtigkeit aus dem Gefach erreicht wird
- V. eine FADAB mit höherer Spreizung im  $s_d$ -Wert Vorteile gegenüber einer FADAB mit geringerer Spreizung bringt
- VI. durch die Verwendung einer OSB anstelle einer diffusionsoffeneren MDF als innenseitige Beplankung erhöhte Feuchten im Gefach auftreten
- VII. die Luftdichtheit der OSB im Vergleich zu einer Dampfbremsbahn geringer ist
- VIII. es in den Gefachen zu Rotationsluftströmungen kommt

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein statistisch begründeter Ansatz zur Berücksichtigung von konvektiven Feuchteinträgen in Dächer präsentiert, wobei neben der Ausführungsqualität auch die Bedingungen bei der Dachfertigung berücksichtigt werden.

Es wird gezeigt, dass die Luftdichtheit des Daches ggf. einen entscheidenden Einfluss auf die Verwendbarkeit der Konstruktion hat.

Des Weiteren wird ein Verfahren hergeleitet, durch welches spezifische Beschattungssituationen bei der Tauglichkeitsbeurteilung von hölzernen Flachdächern berücksichtigt werden können, ohne dass zusätzliche Simulationen der Beschattung notwendig werden. Mit Hilfe einer Grafik zu den maximal möglichen Beschattungsdauern kann die Eignung der Dachkonstruktion schnell beurteilt werden. Das vorgestellte Verfahren wird durch eine Sensitivitätsanalyse überprüft.

Abschließend wird mit Hilfe eines Entscheidungsbaums aufgezeigt, wie die maßgebenden Faktoren auf die Dauerhaftigkeit von hölzernen Flachdächern bei der Planung praxistauglich berücksichtigt werden können.

**Schlagwörter:** Flachdächer, Holzbau, Luftleckage, Beschattung, Entscheidungsbaum, Konstruktionsempfehlungen

## Abstract

In the course of this study the moisture behavior of flat wooden roofs is analysed. Simulations and experimental investigations under varying influencing factors are conducted. Also new scientific methods, which can be used to quickly find the suitable roof construction in the design phase, are developed.

In the first part of this work, ten different full scale flat wooden roofs (membrane roofs, green roofs and sheet metal roofs) are studied. The field experiments are carried out under sun exposed and with six roofs additionally under fulltime shaded conditions. The measured values determine the key factors of the moisture behavior of the roof constructions. The measurements show that:

- I. shading negatively impacts the moisture behavior of the roofs
- II. a green roof shows similar behavior to fully shaded conditions
- III. sheet metal roofs manage moisture best of all roof types
- IV. the inclusion of a smart vapor retarder (SVR) is able to achieve more distinct drying behavior compared to a PE-foil with  $s_d > 100 \text{ m}$
- V. a SVR with a large variation of the  $s_d$ -value is more advantageous than a SVR with a lower variation
- VI. the use of OSB as inner sheeting can result in higher humidity in the cavity than a MDF which is more vapour permeable
- VII. the air tightness of OSB is lower than that of a vapor retarder membrane.
- VIII. free convection occurs in the cavities.

In the second part of the work, a statistical approach is presented to consider air exfiltration into the roofs. In addition to workmanship, the manufacturing condition of the roof is considered. It is shown that the air tightness of the roof could have a decisive impact on the usability of the roof construction.

A method is also derived by which specific shading conditions on the flat roof can be taken into account without the need for additional shading simulations. The suitability of the roof can be rated quickly using a diagram with the maximum shading durations. The proposed method is verified by a sensitivity analysis.

Finally, using a decision tree shows how the important factors in planning a hygrically robust flat wooden roof can be considered in a simple way.

**Keywords:** flat roof, wood construction, air leakage, shading, decision tree, recommendation of constructions

# Formelzeichen

## Lateinische Zeichen

$a$	dimensionslos	solarer Absorptionskoeffizient
$a_{\min}$	dimensionslos	minimal notwendiger solarer Absorptionskoeffizient
$b$	dimensionslos	Strömungsexponent
$d$	in m	Dicke in m
$F_a$	dimensionslos	Luftdichtheitsfaktor
$g$	in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Diffusionstromdichte
$g_{\text{hell}}$	in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Umkehrdiffusionstromdichte des hellen unbeschatteten Daches
$g_{\text{dunkel}}$	in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Umkehrdiffusionstromdichte des dunklen beschatteten Daches
$h$	in m	Höhe des zusammenhängenden Luftraums im Innenraum in m
$h_e$	in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient außen
$I$	in $\text{W}/\text{m}^2$	solare Einstrahlung
$I_{\text{bes}}$	in $\text{W}/\text{m}^2$	solare Einstrahlung bei Vollzeit besonnten Situationen
$I_{\text{besch}}$	in $\text{W}/\text{m}^2$	solare Einstrahlung bei Beschattungssituationen
$I_{\text{dif}}$	in $\text{W}/\text{m}^2$	Diffusstrahlung
$I_{\text{dir}}$	in $\text{W}/\text{m}^2$	Direktstrahlung
$p_v$	in Pa	Wasserdampfpartialdruck im Gefach
$p_{v,\text{dunkel}}$	in Pa	Wasserdampfpartialdruck im Gefach mit dunkler Dachbahn
$p_{v,\text{hell}}$	in Pa	Wasserdampfpartialdruck im Gefach mit heller Dachbahn
$p_{v,i}$	in Pa	Wasserdampfpartialdruck im Innenraum
$p_{v,\text{Sat}}$	in Pa	Sättigungsdampfdruck im Gefach
$Q$	in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Leckagevolumenstrom
$Q_{50}$	in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	Durchströmung der Hülle bei 50 Pa Druckdifferenz
$SF$	dimensionslos	Sichtfaktor zum Himmel
$T_e$	in K	Lufttemperatur im Außenbereich
$T_i$	in K	Lufttemperatur im Innenraum
$t_{\text{besch}}$	in Stunden	Beschattungsdauer
$t_{\text{end}}$	Stunde im Jahr	Endzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung
$t_{\text{rueck}}$	in Stunden	Rücktrocknungszeitraum
$t_{\text{start}}$	Stunde im Jahr	Startzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung
$u$	in M-%	Materialfeuchte der außenseitigen OSB
$u_{\max}$	in M-%	maximale Materialfeuchte der außenseitigen OSB
$u_R$	in M-%	Referenzmaterialfeuchte der außenseitigen OSB des unbeschatteten Daches
$u_{R,\max}$	in M-%	maximale Referenzmaterialfeuchte der außenseitigen OSB des unbeschatteten Daches

**Griechische Zeichen**

$\Delta IR$	in $W/m^2$	Infrarot Zusatzverluste an den klaren Himmel
$\Delta P$	in Pa	Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich
$\delta$	in $kg/(m.s.Pa)$	Diffusionsleitfähigkeit des Bauteils
$\delta_a$	in $kg/(m.s.Pa)$	Diffusionsleitfähigkeit der ruhenden Luft
$\varepsilon$	dimensionslos	Emissionsvermögen der Baustoffoberfläche
$\theta$	in $^{\circ}C$	Lufttemperatur
$\theta^*$	in $^{\circ}C$	Strahlungslufttemperatur
$\theta_{min}^*$	in $^{\circ}C$	minimal notwendige Strahlungslufttemperatur ohne Beschattung
$\mu$	dimensionslos	Diffusionswiderstandszahl
$\Upsilon$	dimensionslos	Materialfeuchtequotient

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	2
<b>2 Stand des Wissens</b> .....	<b>3</b>
2.1 Dachkonstruktionen mit außenseitig hohen Diffusionswiderständen.....	3
2.2 Konvektive Feuchteinträge in Leichtbaukonstruktionen.....	9
2.3 Konstruktionsempfehlungen für hölzerne flachgeneigte Dachkonstruktionen ...	13
2.4 Zulässige Materialfeuchten in Holzbauteilen .....	15
2.5 Fazit .....	17
<b>3 Experimentelle Analyse flachgeneigter Dachkonstruktionen</b> .....	<b>19</b>
3.1 Versuchsaufbauten und Messtechnik .....	19
3.2 Erkenntnisse zu Foliendächern.....	23
3.3 Erkenntnisse zu Gründächern .....	27
3.4 Erkenntnisse zu metallgedeckten Dächern.....	29
3.5 Fazit .....	31
<b>4 Neue Ansätze zur Berücksichtigung wichtiger Einflussfaktoren</b> .....	<b>33</b>
4.1 Konvektive Feuchteinträge .....	33
4.1.1 Ansatz zur Quantifizierung konvektiver Feuchteinträge.....	33
4.1.2 Auswirkung konvektiver Feuchteinträge .....	37
4.2 Beschattungssituationen.....	43
4.2.1 Auswirkungen temporärer Beschattungen.....	43
4.2.2 Ansatz zur Ermittlung der maximal möglichen Beschattungsdauer .....	50
4.2.3 Sensitivitätsanalyse .....	56
4.2.4 Tauglichkeitskriterium .....	65
4.3 Konstruktionsempfehlungen .....	67

<b>5</b>	<b>Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse .....</b>	<b>71</b>
5.1	Neuerung gegenüber Stand des Wissens .....	71
5.2	Grenzen der gewonnenen Erkenntnisse.....	73
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>79</b>
<b>A.1</b>	<b>Aufbau der experimentell untersuchten Dächer.....</b>	<b>85</b>
<b>A.2</b>	<b>Eingesetzte Messtechnik .....</b>	<b>91</b>
<b>A.3</b>	<b>Publikationen .....</b>	<b>93</b>
A.3.1	Aufsatz I.....	93
A.3.2	Aufsatz II.....	107
A.3.3	Aufsatz III.....	117
A.3.4	Publikationsliste .....	127

# 1 Einführung

## 1.1 Problemstellung

Flachgeneigte Dachkonstruktionen aus Holz stellen und stellen einen architektonischen Trend sowohl im Wohnungsbau als auch im Objektbau dar. In den letzten Jahrzehnten wurden Holzelemente mit beidseitig stark diffusionshemmenden Schichten und Sparrenvollämmung infolge ihrer bautechnischen und wirtschaftlichen Vorteile forciert. Diese Varianten stellen jedoch ein schwer kalkulierbares Sicherheitsrisiko dar, da eindringende Feuchtigkeit keine Möglichkeit zum Austrocknen hat. Solche „dicht-dicht“-Aufbauten bilden eine regelrechte Feuchtefalle.

Abb. 1 zeigt die Auswertung von 22 Gutachten und persönlichen Gesprächen zu Schadensfällen an Flachdächern. Wie zu erkennen ist, ist ein Großteil der Schäden auf konvektive Feuchteinträge durch Leckagen in der innenseitigen Luftdichtheitsschicht zurück zu führen. Auch von Fuhrmann (2003); Hall und Hauser (2003); Mattsson (2007); Kalamees et al. (2008) werden ungenügend dichte Bauteilanschlüsse und Elektroinstallationen als typische Gründe für eine geringe Luftdichtheit von Gebäuden und konvektionsbedingte Feuchteschäden aufgeführt. Diverse gutachtliche Untersuchungen durch die Holzforschung Austria (HFA) bestätigen diese Aussagen und zeigen, dass 100 % luftdichte Konstruktionen bautechnisch so gut wie nicht auszuführen sind. Mögliche konvektive Feuchteinträge müssen deshalb bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden und bei Konstruktionen mit hohen außenseitigen Diffusionswiderständen in den Innenraum abtrocknen können.

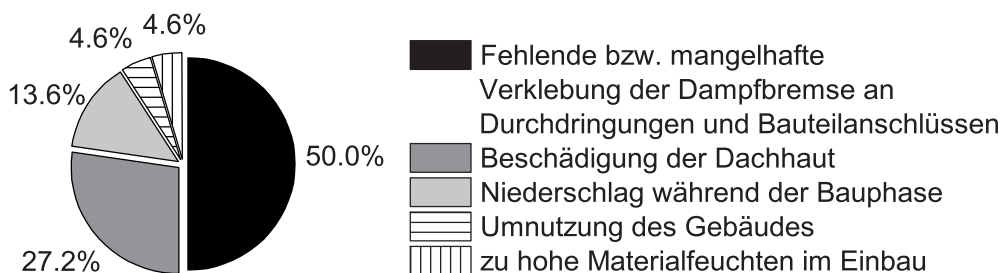


Abb. 1: Auswertung von 22 Gutachten und persönlichen Gesprächen zu Schadensfällen an Flachdächern

Aus diesem Grund werden innenseitig häufig feuchteadaptive Dampfbremsen (FADAB) [Künzel und Kaufmann (1995)] eingesetzt. Um das dadurch mögliche Rücktrocknungspotential auszuschöpfen, sind erhöhte Temperaturen im Gefach notwendig. Durch Grün-

dächer, Kiesauflagen u.ä. oder durch den Schattenwurf von Dachaufbauten und hoher benachbarter Gebäude wird eine direkte Erwärmung der Dachfläche durch die Sonne jedoch verhindert, was zu einer Feuchteakkumulation und somit zu Schäden im Dach führen kann.

## **1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise**

Ziel dieser Arbeit ist es, die maßgebenden Faktoren zur Errichtung hygrysch robuster flachgeneigter Dachkonstruktionen in Holzbauweise zu erarbeiten, quantifizierbar zu machen und für die Planungspraxis aufzuarbeiten.

Hierfür werden im Anschluss an die Literaturlauswertung zum Stand des Wissens verschiedene hölzerne Flachdachkonstruktionen (Foliendächer, Gründächer, Metaldächer) im Freiland experimentell untersucht. Anhand der so gewonnen Messdaten werden die hygryschcn Vorgänge in den verschiedenen Dachkonstruktionen analysiert und die maßgebenden Faktoren auf die Dauerhaftigkeit dieser Dächer aufgezeigt.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden neue Ansätze zur Berücksichtigung wichtiger Einflussfaktoren erarbeitet. Die präsentierten Ansätze werden durch instationäre Simulationen überprüft und bewertet.

Abschließend wird anhand eines Entscheidungsbaums aufgezeigt, wie die Interaktion der maßgebenden Einflussfaktoren und die dadurch resultierenden Konstruktionsempfehlungen für Planer praxistauglich wiedergegeben werden können.

## 2 Stand des Wissens

Nachfolgend wird in chronologischer Reihenfolge die Entwicklung zum aktuellen Stand des Wissens in folgenden vier Themenbereichen aufgezeigt.

- I. Dachkonstruktionen mit außenseitig hohen Diffusionswiderständen
- II. Konvektive Feuchteinträge in Leichtbaukonstruktionen
- III. Konstruktionsempfehlungen für hölzerne flachgeneigte Dachkonstruktionen
- IV. Zulässige Materialfeuchten in Holzbauteilen

### 2.1 Dachkonstruktionen mit außenseitig hohen Diffusionswiderständen

Dachkonstruktionen mit außenseitig hohen Diffusionswiderständen wurden in der Vergangenheit in der Regel auch innenseitig mit sehr hohen Diffusionswiderständen ausgeführt. So ist in Rick (1958) beispielsweise zu lesen: „Aus diesem Grunde muß jede Wärme-Dämmschicht mit einer Dampfsperre, einem hochdampfdichten Stoff, eingehüllt werden,...“

Jenisch und Schüle (1973) weisen stützend auf die rechnerische Untersuchung eines betonierten Flachdaches jedoch bereits auf das notwendige Rücktrocknungspotential bei Dächern mit außen stark dampfbremsenden Abdichtungen hin. Eine „...völlig dampfdichte Dampfsperre...“ sei nur dann notwendig, wenn eine stetige Zunahme der Dämmstofffeuchte zu erwarten ist. Sie empfehlen bei Wohn- und Bürobauten eine Dampfbremse mit einem  $s_d$ -Wert von 20 m, um einen maximalen Feuchtegehalt des Dämmstoffes von 500 g/m<sup>2</sup> nicht zu überschreiten.

Gemäß Künzel (1978) wird durch die Verwendung einer Dampfbremse mit einem  $s_d$ -Wert von 100 m bei außenseitiger Dachabdichtung gewährleistet, dass keine nachteilige Feuchtigkeitserhöhung im Dämmstoff auftritt. Dieser  $s_d$ -Wert wurde ebenfalls in der damaligen DIN 18530 – Massive Deckenkonstruktionen für Dächer; Planung und Ausführung, festgelegt. Es können gemäß den von Künzel getätigten experimentellen und rechnerischen Untersuchungen jedoch auch Dampfbremsen mit einem geringeren  $s_d$ -Wert verwendet werden, solange Dachabdichtung und Dampfbremse nach dem Glaser-Verfahren aufeinander abgestimmt werden.

Künzel (1995) weist durch rechnerische Untersuchungen mit WUFI® [Künzel (1994)] an Steildächern auf die Sensitivität außen dampfdichter Konstruktionen auf eindringende Feuchtigkeit und die praktisch kaum zu vermeidenden innenseitigen Leckagen hin. Eine Dampfbremse mit hohem  $s_d$ -Wert (> 100 m) wird als lediglich theoretische Lösung bezeichnet.

Künzel und Kaufmann (1995) zeigen anhand von rechnerischen Untersuchungen an einem nach außen quasi dampfdichtem und innenseitig luftdichtem nordorientierten Steildach die Wirkungsweise der damals neuartigen feuchteadaptiven Dampfbremse. Im Gegensatz zur Dachvariante mit einer Dampfbremse mit einem  $s_d$ -Wert von 2 m zeigt sich bei der Variante mit der FADAB keine Feuchteakkumulation im Dach.

Künzel und Großkinsky (1998) zeigen anhand ihrer experimentellen Untersuchungen an unbelüfteten 50° geneigten nord- und südorientierten luftdichten metallgedeckten Dächern, mit unterschiedlichen Dampfbremsen (PE-Folie, PA-Folie (FADAB), Natronkraftpapier) und innenseitigen Beplankungen (Gipskartonplatte, Spanplatte), dass der Einsatz einer FADAB im Vergleich zu einer PE-Folie mit einem  $s_d$ -Wert von 50 m Vorteile im Rücktrocknen von eingeschlossener Feuchtigkeit bringt. Alternativ kann jedoch auch eine Dampfbremse mit einem fixen  $s_d$ -Wert von 2 m verwendet werden. Es zeigt sich ebenfalls der wichtige Einfluss einer hohen Dachoberflächentemperatur auf die Rücktrocknung der eingeschlossenen Feuchte. Aufgrund der vorhandenen Umkehrdiffusion wird Kondensat auf den Dampfbremsen festgestellt. Der Einfluss der innenseitigen Beplankung ist gering, wobei ein niedrigerer  $s_d$ -Wert zu einer etwas schnelleren Rücktrocknung führt.

Künzel (1999b) weist auf die Notwendigkeit zur Ausschöpfung möglicher Rücktrocknungspotentiale für hölzerne Flachdächer und die hierfür notwendigen hohen Temperaturen im Gefach hin. Es wird anhand von Messungen an mineralischen Umkehrdächern gezeigt, dass eine Dachbegrünung vergleichbare thermische Auswirkungen auf die Dachhauttemperatur wie ein Kiesbett oder eine Deckschicht aus Pflastersteinen hat.

Gonin et al. (2003) untersuchen durch WUFI®-Simulationen das Verhalten von außenseitig abgedichteten Flachdächern aus hölzernen Hohlkastenelementen. Die Funktion der innenseitigen Dampfbremse wird bei diesen Elementen i.d.R. durch eine 3-Schichtplatte übernommen. Anhand von aufgenommenen Schadensfällen wird u.a. die Problematik der Feuchteumverteilung zwischen Ober- und Untergurt (äußere/innerer Beplankung) erläutert. Sie zeigen, dass es aufgrund des unterschiedlichen Quell und Schwindverhaltens der beiden Gurte zu einer Wölbung des Daches kommen kann.

Es wird empfohlen, die innenseitige Beplankung möglichst gering zu dimensionieren und somit den innenseitigen Diffusionswiderstand nieder zu halten. Die Hohlkastenelemente sollten nicht in kalten Gebieten eingesetzt werden, da hier das Rücktrocknungspotential zu gering ist. Es wird zusätzlich auf die Problematik einer Beschattung der Dachfläche hingewiesen. Gonin et al. diskutieren ebenfalls Untersuchungen zu Temperaturen unterhalb einer extensiven 10 cm starken Begrünung und einer 5 cm starken Kiesschicht [Kaufmann (1999)]. Wie gezeigt wird, stellen sich im Sommer unterhalb des Gründachsubstrats deutlich geringere Temperaturen als unter der Kiesschicht ein. Gemäß Gonin et al. können sich bei Gründächern somit Probleme durch Feuchteakkumulation im Dach ergeben. Es wird vermutet, dass dies bei Kiesschichten weniger stark ausgeprägt ist.

Gonin et al. weisen ebenfalls auf die unbedingt notwendige luftdichte Ausführung der

Konstruktion und die Nichtbeachtung konvektiver Feuchteinträge bei der Parameterstudie hin.

Wakili, K. G.; Frank, T. (2003); Wakili und Frank (2004) untersuchen anhand von Messungen und numerischen Simulationen des Verhalten von unterschiedlichen Flachdachaufbauten mit Auflast. Es werden insgesamt drei Flachdächer auf einem Schulpavillon, einer Sporthalle und eines Einfamilienhauses (Lager/Abstellraum) im Bereich um Zürich über 12 bzw. 9 Monate messtechnisch begleitet. Auf allen Dachabdichtungen ist eine Auflast in Form eines Kiesbetts oder einer Zementierung aufgebracht. Die Aufbauten unterscheiden sich durch die Wahl des Dämmstoffs (MIWO/Zellulose) und dem Vorhandensein einer FADAB. Die höchste raumklimatisch bedingte Feuchtelast zeigt der Schulpavillon mit einer Innentemperatur von  $(21 \pm 3)^\circ\text{C}$  und einer r.LF. von  $(61 \pm 14) \%$ . Das Flachdach auf diesem Gebäude besitzt eine FADAB und ist mit Mineralwolle ausgedämmt. Wie die Messungen zeigen, stellt sich an der Gefachaußenseite unterhalb der Beplankung (3-Schichtplatte) eine lange andauernde hohe r.LF. von  $> 90 \%$  und Materialfeuchten der außenseitigen Beplankung von  $> 20 \text{ M} \%$  ein.

In den anderen Dachaufbauten dieser Untersuchung (Variante mit Zellulose und Variante ohne FADAB nur mit 3-Schichtplatte) zeigen sich solch hohe Feuchten im Gefach nicht. Es ist jedoch zu beachten, dass dort jeweils deutlich geringere raumseitige Feuchtelasten herrschen.

Gemäß Wakili und Frank (2004) können 3-Schichtplatten aufgrund ihres quasi feuchteadaptiven Diffusionswiderstandes die Funktion einer FADAB übernehmen und diese ersetzen.

Weitere Untersuchungen von Wakili, K. G.; Frank, T. (2003) über 13 Monate an extensiven Gründächern mit einer PA-Folie (FADAB) und einer PE-Folie als Dampfbremse und einer Variante ohne Dampfbremse zeigt ein nahezu identes Verhalten der drei Gründächer in Bezug auf die r.LF. an der Gefachaußenseite. In allen drei Varianten steigt die r.LF. dort für einen langen Zeitraum auf  $> 80 \%$ .

Die innenseitige Raumlufftfeuchte beträgt bei diesen Untersuchungen etwa  $(45 \pm 10) \%$ .

Häupl und Petzold (2007) untersuchen, motiviert durch einen Schadensfall an einem Gründach, das hygrothermische Verhalten von hölzernen Gründächern und Bitumendächern ohne Auflast mittels numerischer Simulation. Sie kommen zu dem Schluss, dass Gründächer bei sorgfältiger, luftdichter Ausführung und trockenen Baumaterialien funktionieren können, weisen jedoch auf das fehlende Rücktrocknungspotential und das hohe Schadensrisiko von Gründächern mit Zwischensparrendämmung hin. Das Bitumendach verhält sich in den dortigen Untersuchungen deutlich günstiger.

Roßbach (2007) untersucht in ihrer Diplomarbeit anhand von WUFI®-Simulationen diverse Flachdachaufbauten. Sie variiert hierbei u.a. die Einbaufeuchten der Materialien, die solaren Absorptionskoeffizienten der Deckschicht, die durch innenseitige Leckagen zusätzlich eindringende Feuchtemenge (Pauschalbetrag) sowie die innen und außenseitig angebrachten  $s_d$ -Werte. Es wird gezeigt, dass Foliendächer ohne Auflast und mit dunkler Dachbahn ein hohes Rücktrocknungspotential besitzen und in diesen Dächern auf den

chemischen Holzschutz verzichtet werden kann (Gebrauchsklasse 0 nach DIN 68800). Auf eine Bekiesung oder Begrünung dieser Dächer soll gemäß Roßbach jedoch nach Möglichkeit verzichtet werden, da unplanmäßig eindringende Feuchtigkeit kaum rücktrocknen kann. Helle Dachbahnen wirken sich ähnlich wie eine Begrünung oder Bekiesung negativ auf den Feuchtehaushalt des Daches aus.

Es wird in der Arbeit auch die positive Wirkung einer Zusatzdämmung über der Dachabdichtung hervorgehoben. Diese soll jedoch mindestens 10 cm stark ausgeführt werden, da für Dämmstärken darunter der positive Effekt kaum hervortritt bzw. sich sogar ins Negative wandeln kann. Auch bei hohen zusätzlichen Dämmstoffdicken ist auf eine eher diffusionsoffene Dampfbremse zurück zu greifen.

Bludau et al. (2008) zeigen anhand von WUFI<sup>®</sup>-Simulationen eines luftdichten Foliendaches ohne Auflast die hygrischen Auswirkungen von hellen und dunklen Dachbahnen sowie unterschiedlichen Standorten auf ein hölzernes Flachdach mit Bitumenabdichtung. Während die Dachkonstruktion in Dubai (UAE) auch mit einer hellen Dachbahn funktioniert, ist das Dach in Holzkirchen (D) und Kopenhagen (DK) nur mit einer dunklen Dachbahn tauglich. Bei kalten Außenklimabedingungen wie sie in Helsinki (FIN) herrschen, versagt das Dach hingegen auch mit einer dunklen Dachbahn.

Winter et al. (2009) untersuchen anhand eines 15 monatigen Freilandversuchs in Leipzig (D) das hygrothermische Verhalten von acht unterschiedlichen Flachdachaufbauten aus Holz. Variiert wird die innenseitige Dampfbremse (FADAB mit hoher Spreizung bzw. OSB), der Dämmstoff im Gefach (MIWO bzw. Zellulose) sowie der Aufbau oberhalb der Dachabdichtung (dunkle Dachbahn ohne Auflast bzw. mit Gründach). Es wird ebenfalls je ein Dachelement mit Bekiesung und eines mit einer hellgrauen Dachbahn untersucht. Zur Simulation einer Beschattung wird 15 cm über der Dachfläche eines Folienelements eine horizontale Werkstoffplatte befestigt. Die Innenraumlufttemperatur beträgt bei den dortigen Untersuchungen etwa  $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$  und die Raumlufftfeuchte etwa  $(50 \pm 6) \%$ .

Wie die Messungen zeigen, ist ein Einfluss der Dampfbremse beim Foliendach mit Mineralwollgedämmung kaum zu erkennen. Die gefachaußenseitigen r.LF. beider Konstruktionen sind sehr ähnlich. Die Messkurven sind aufgrund von Fühlerausfällen jedoch nicht über den gesamten Untersuchungszeitraum vergleichbar.

Auf die Bedingungen in dem beschatteten Element wird nicht näher eingegangen.

Beim zellulosegedämmten Foliendach zeigt die Variante mit FADAB eine geringere r.LF. auf der Gefachaußenseite als die Variante mit einer OSB als Dampfbremse und generell eine geringere r.LF. als die Foliendächer mit Mineralwollgedämmung.

Die Gründächer mit FADAB zeigen geringere r.LF. auf der Gefachaußenseite als jene mit OSB als Dampfbremse, wobei die zellulosegedämmten Variante wiederum die geringste gefachaußenseitige r.LF. zeigt.

Materialfeuchtemessungen in den Dächern zeigen lediglich in einem Foliendach mit MIWO-Dämmung Feuchten von  $> 20 \text{ M-}\%$  (max.  $27 \text{ M-}\%$ ) der außenseitigen OSB-Beplankung. Schimmelpilze konnten in diesem Dach nicht festgestellt werden, jedoch in einem Gründach mit nicht anliegendem Zellulosedämmstoff.

Die Klimate auf der Gefachinnenseite wurden bei den experimentellen Untersuchungen nicht erfasst.

Es werden von Winter et al. ebenfalls weiterführende Parameterstudien mit WUFI® durchgeführt. U.a. werden neben einer vollzeitigen Beschattung auch konvektive Feuchteinträge berücksichtigt. Hierfür werden Pauschalbeträge (250 g/m<sup>2</sup>, 150 g/m<sup>2</sup>, 50 g/m<sup>2</sup>) gleichmäßig auf sieben Wintermonate aufgeteilt und als Feuchtequelle festgelegt, d.h. z.B. für 250 g/(m<sup>2</sup>.Winter) => 1,36e-8 kg/(m<sup>2</sup>.s).

Stützend auf die gewonnenen Messergebnisse, die Parameterstudien und Begutachtungen gebauter Objekte kommen Winter et al. zu folgenden Schlüssen:

- I. Zellulosedämmstoff wirkt sich aufgrund seiner höheren Feuchtekapazität im Vergleich zu MIWO positiv auf den Feuchtehaushalt unbelüfteter Flachdächer aus.
- II. Eine FADAB mit hoher Spreizung ist einer OSB als innenseitige Dampfbremse eindeutig vorzuziehen.
- III. Dunkle Dachabdichtungen sind hellen vor zu ziehen.
- IV. Beschattungssituationen sind im Einzelfall zu betrachten.

Bachinger (2010) untersucht in ihrer Dissertation 25 gebaute Flachdächer in Holzrahmenbauweise mit Dachabdichtung anhand von WUFI®-Simulationen. Bei 24 der 25 Dachaufbauten sind innenseitig Dampfbremsen mit  $s_d$ -Werten von 150 m bis > 1700 m angebracht. Zur Datenerhebung führt Bachinger auch Interviews mit den beteiligten Planern und Sachverständigen durch. An 48 % der untersuchten Dachaufbauten kam es zu Feuchteschäden, wobei an den Dächern auf Gebäuden mit nachgewiesener Luftdichtheit (20 % mit  $n_{50} < 0,8 \text{ h}^{-1}$ ) keine Schäden festgestellt werden konnten. Die rechnerischen Untersuchungen von Bachinger erfolgen ohne Berücksichtigung eines konvektiven Feuchteintrags. Wie die getätigte Simulationsstudie zeigt, hat eine Variation des  $s_d$ -Werts der Dampfbremse (150 m bis > 1700 m) keinen signifikanten Einfluss auf den Feuchtehaushalt der Dächer.

Es wird in der Studie ebenfalls der  $s_d$ -Wert der Dachabdichtung variiert. Bei Dachabdichtungen mit niederem  $s_d$ -Wert ist ein tendenziell besseres hygrisches Verhalten zu beobachten.

Als entscheidenden Einflussfaktor wird von Bachinger jedoch der solare Absorptionskoeffizient der Dachabdichtung genannt.

Um Verbesserungsvorschläge für die ausgeführten Flachdachelemente auszusprechen, beurteilt Bachinger anhand von WUFI® Simulationen u.a. den Einfluss einer Zusatzdämmung auf der außenseitigen Beplankung sowie den Einfluss von feuchteadaptiven Dampfbremsen.

Sie kommt zu dem Schluss, dass eine Zusatzdämmung die hygrische Belastung auf die außenseitige Beplankung i.A. verringert. Abhängig von der Dämmstoffdicke der Zusatzdämmung kann sich die hygrische Belastung jedoch auch verstärken. Individuelle Betrachtungen sind zur richtigen Dimensionierung der Zusatzdämmung notwendig. Anhand der Simulationsstudie zum Einsatz von FADABs verdeutlicht Bachinger, dass mit anteiligem solarem Absorptionskoeffizient der Dachbahn die Dachelemente mit FADAB ein

zunehmend günstigeres hygrisches Verhalten aufweisen als mit einer Dampfbremse mit fixem hohem  $s_d$ -Wert.

Bludau et al. (2010b) diskutieren in ihrem Beitrag die Modifikation von Solar-Strahlungsdaten, um bei instationären Simulationen eine Beschattung der Dachfläche durch geneigte PV-Module abzubilden. Das diskutierte Modell berücksichtigt neben der abgehaltenen Direktstrahlung und der reduzierten langwelligen Abstrahlung der Dachfläche auch den langwelligen Strahlungsaustausch mit dem PV-Modul. Wie Bludau et al. anhand von WUFI®-Simulationen zeigen, wirkt sich die Beschattung durch die PV-Module sehr ungünstig auf den Feuchtehaushalt in den untersuchten hölzernen Flachdachelementen aus. Noch kritischer erweist sich jedoch, aufgrund der ungestörten langwelligen Abstrahlung, eine weiße unbeschattete Dachbahn mit einem solaren Absorptionskoeffizient von 0,3.

Bludau et al. (2010a) verdeutlichen anhand von Messwerten und WUFI®-Simulationen die hygrothermischen Vorgänge in der Dämmebene eines aufdachgedämmten Daches mit Mineralwollendämmung. Die betrachteten Dachflächen setzen sich aus einer Fläche mit einer rotbraunen Dachbahn mit einem solaren Absorptionsgrad von 0,9, einer weißen Dachbahn mit 0,2 und einer Fläche, welche durch ein geneigtes PV-Modul beschattet wird. Die Messergebnisse zeigen, dass die weiße Dachbahn während des Tages etwas wärmer und während der Nacht, aufgrund der ungestörten langwelligen Abstrahlung, etwas kühler (je  $\sim 5$  K) als die beschattete Dachfläche wird. Bludau et al. kommen zu dem Schluss, dass eine Simulation mit einem solaren Absorptionsgrad von 0,2 bei Berücksichtigung der langwelligen Abstrahlung den Beschattungseffekt durch das PV-Modul abdeckt.

## 2.2 Konvektive Feuchteinträge in Leichtbaukonstruktionen

Auf die Probleme durch konvektive Einträge von warmer Raumluft in Außenbauteile (Luftexfiltration) wird schon früh hingewiesen. Wilson, A. G. (1961) verdeutlicht, dass die leakagebedingte Kondensatbildung im Bauteil aufgrund des thermischen Auftriebs und der Windanströmung deutlich von der Lage des Bauteils und dem Innenklima abhängt. Er bezeichnet die Ausführungsqualität neben der Konstruktionsart und der Materialqualität als maßgebende Größe zur Steuerung des konvektiven Feuchteintrags in Bauteile.

Zur rechnerischen Berücksichtigung von Leckageströmen beziffert Janssens (1998) anhand von Messungen an drei unterschiedlichen Schadensfällen an Dächern und stützend auf eine Literaturrecherche die zu erreichende Luftdichtheit von Bauteilen mit Foliendampfbremsen nach europäischem Baustandard der 1990er Jahre mit

$$Q_{\text{Jan}} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta P \quad (2.1)$$

Q Leckagevolumenstrom in  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$\Delta P$  Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa

Künzel (1999a) empfiehlt für Holzkonstruktionen aufgrund von Luftdichtheitsuntersuchungen in Nordamerika [TenWolde et al. (1998)], die Beachtung konvektiver Feuchteinträge durch einen pauschalen Feuchtezuschlag von  $250 \text{ g/m}^2$  während der Tauperiode.

Geißler (2001) zeigt anhand einer statistischen Auswertung von 133 Luftdichtheitsmessungen an zumeist Holzhäusern, dass Leckagen durch Installationen bei etwa 90 % aller untersuchten Gebäude auftreten. Er zeigt auch, dass der Volumenstromanteil durch Steckdosen und Lichtschalter am gesamten Luftwechsel des Gebäudes gering ist, er liegt bei etwa 5 %.

Geißler und Hauser (2002) untersuchen anhand von Experimenten und CFD-Simulationen das Gefährdungspotential von Luftexfiltration durch unterschiedliche Spaltgeometrien. Wie sich zeigt, weisen schnell durchströmte, geradlinige Spalten ein eher geringes Gefährdungspotential bzgl. Feuchteschäden auf. Der Leckageluftstrom kühlt bei der schnellen Durchströmung des Bauteils kaum ab, wodurch nur geringe Mengen an Feuchtigkeit ausfallen. Deutlich kritischer verhalten sich langsam durchströmte Leckagepfade mit Luftumlenkung an der Außenseite im Gefach. Der langsam an der kalten Beplankung vorbeistreichende Leckageluftstrom kühlt stark ab, wodurch große Mengen an Kondensat ausfallen können. Künzel et al. (2010) bezeichnen Leckagen mit solchen Strömungspfaden als „Feuchteleckagen“ im Gegensatz zu den hygrysch eher unkritischen „Wärmeleckagen“.

Hall und Hauser (2003) untersuchen in ihrer Arbeit 51 Einfamilienhäuser in Holzleichtbauweise in Deutschland bzgl. derer Luftdichtheit. Es werden in der Arbeit ebenfalls die einzelnen Leckageströme quantitativ erfasst.

Neben Türen und Spitzbodenlücken zählen Installationen zu den am häufigsten vorkommenden leckagebehafteten Durchdringungen. Anhand zweier Gebäude errechnen sie den Volumenstromanteil durch Steckdosen und Lichtschalter am gesamten Luftwechsel des Gebäudes zu 8 % bzw. 12 %.

Sie quantifizieren die Luftvolumenströme durch einzelne Leckagen wie Steckdosen, Lichtschalter, Löcher in Folien etc. anhand von In-Situ Messungen und Laboruntersuchungen. Während die In-Situ Messungen bei einer Druckdifferenz von 50 Pa durchgeführt werden, erfolgen die Laboruntersuchungen bei abgestuften Druckdifferenzen von 10 Pa bis 50 Pa.

Kalamees (2007) untersucht 32 Einfamilienhäuser in Estland auf ihre Luftdichtheit hin, wobei 29 der 32 Häuser Holzrahmen- und die restlichen drei Stahlträgerkonstruktionen sind. Die Gebäude wurden teilweise von Hausherrn oder Fachkräften auf der Baustelle errichtet und teilweise von Hausbaufirmen vorgefertigt.

Wie zu erkennen ist, wirkt sich die Art der Fertigung stark auf die Luftdichtheit aus. Vorgefertigte Gebäude zeigten eine deutlich höhere Luftdichtheit als nicht vorgefertigte und baustellengefertigte Gebäude mit Qualitätsüberwachung zeigen wiederum eine bessere Luftdichtheit als jene ohne Qualitätsüberwachung.

Als typischen Leckagewege werden u.a. Durchdringungen elektrischer und sanitärer Installationen durch die Luftdichtheitsschicht genannt.

Kalamees et al. (2008) untersuchen 21 Einfamilienhäuser verschiedener Bauweisen (Holzbau, Ziegel, Beton) und 16 Apartments in Finnland bzgl. Luftdichtheit und Wärmebrücken. Es zeigt sich hierbei, dass im Hausbau der Anteil an Durchdringungen der innenseitigen Luftdichtheitsschicht höher ist als im Wohnungsbau.

Zirkelbach et al. (2009) entwickeln basierend auf den von Künzel (1999a) vorgeschlagenen 250 g/m<sup>2</sup> konvektiven Feuchteeintrag pro Tauperiode ein instationäres Modell zur Berücksichtigung konvektiver Feuchteinträge. Hierfür wird der Leckagevolumenstrom aufgrund „Feuchteleckagen“ linear von  $\frac{1}{15}$  des  $Q_{50}$ -Werts (Durchströmung der Hüllfläche bei 50 Pa Druckdifferenz) des Gebäudes abgeleitet.

In Bezug auf die in Deutschland normativ geregelten Anforderungen an die Luftdichtheit von Gebäuden werden von Zirkelbach et al. (2009) drei Luftdichtheitsklassen A ( $Q_{50} \leq 1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ), B ( $Q_{50} \leq 3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) und C ( $Q_{50} \leq 5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) vorgeschlagen. Umgerechnet auf die Volumenströme ergeben sich daraus folgende drei Volumenstromfunktionen:

$$Q_{\text{Zir,A}} = 3,88 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta P \quad (2.2)$$

$$Q_{\text{Zir,B}} = 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P \quad (2.3)$$

$$Q_{\text{Zir,C}} = 1,86 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P \quad (2.4)$$

Hens (2010) schlägt einen Leckageluftvolumenstrom von

$$Q_{\text{Hens}} < 1 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta P^b \quad (2.5)$$

Q Leckagevolumenstrom in  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$\Delta P$  Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa

b Strömungsexponent

zur Berücksichtigung von Luft-Exfiltrationen in Bauteile vor. Er führt ebenfalls eine Sammlung von Luftdichtheitskennwerten verschiedener Bauteile und Materialien an.



## 2.3 Konstruktionsempfehlungen für hölzerne flachgeneigte Dachkonstruktionen

Im Merkblatt zum „Feuchteschutz bei Flachdächern in Holzbauweise“ [SVDW (2007)] werden folgende Flachdachkonstruktionen nach ihrer hyrischen Robustheit beurteilt sowie generelle Planungs- und Ausführungsempfehlungen ausgesprochen (Reihung nach abnehmender hygrischer Robustheit):

- A) Nicht durchlüftete Konstruktionen – Wärmedämmung auf der Tragkonstruktion
- B) Durchlüftete Konstruktionen
- C) Nicht durchlüftete Konstruktionen mit Wärmedämmung innerhalb der Tragkonstruktion und Zusatzdämmung
- D) Nicht durchlüftete Konstruktionen mit Wärmedämmung innerhalb der Tragkonstruktion

Die Konstruktionen C) und D) werden als gering fehlertolerant eingestuft, wodurch erhöhte Planungsaufwände notwendig werden. Dampfbremsen mit einem  $s_d$ -Wert  $> 10$  m sind demnach nicht zulässig. Es wird auf die notwendige Luftdichtheit hingewiesen und von einer Baustellenfertigung abgeraten. Ebenfalls wird auf die negativen hygrischen Auswirkungen einer Beschattung hingewiesen.

Im Infodienst Holz spezial „Flachdächern in Holzbauweise“ [Holzabsatzfond (2008)] werden Konstruktionsempfehlungen zu folgenden Flachdachaufbauten ausgesprochen und diese im Hinblick auf Wärme-/Feuchte-/Brand- und Schallschutz sowie Holzschutz bewertet:

- A) Belüftete Flachdächer
  - 1) Volldämmung mit unterlüfteter Dachhaut und Dachabdichtung
  - 2) Volldämmung mit unterlüfteter Dachhaut und Bekiesung
  - 3) Belüftete Dämmebene und Metaldachdeckung
- B) Nicht belüftete Flachdächer mit Vollsparrendämmung
  - 1) Dachabdichtung mit innenseitiger Installationsebene
  - 2) Metaldachdeckung mit innenseitiger Installationsebene
  - 3) Dachabdichtung mit beidseitiger Beplankung (Holztafelbau)
- C) Aufdachgedämmte Flachdächer
  - 1) Aufsparrendämmung
  - 2) Aufdachdämmung auf Flächentragwerk

Grundlage der hygrothermischen Einstufung sind WUFI®-Simulationen. Um konvektive Feuchteinträge zu simulieren, wird jeweils eine zusätzliche Feuchtemenge von pauschal  $250 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$  in den Gefachen berücksichtigt. Als Außenklima wird Holzkirchen gewählt und als Innenklima eine normale Feuchtelast gemäß WTA-Merkblatt 6-2-01/D von  $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$  und  $(50 \pm 10) \% \text{ r.LF}$ . Die Grenzbedingung für eine positive Beurteilung wird durch eine Materialfeuchte von 20 M-% definiert, wobei diese im ersten Jahr auch über-

schritten werden darf.

Es wird in [Holzabsatzfond (2008)] ebenfalls wiederholt auf die Notwendigkeit des Rücktrocknungspotentials unbelüfteter Flachdächer eingegangen. Die Problematik, welche eine Beschattung der Dachfläche oder eine Dachbegrünung diesbezüglich mit sich bringt, wird kurz angesprochen, ohne jedoch näher darauf einzugehen.

Winter et al. (2009) stufen stützend auf ihre oben beschriebenen Untersuchungen folgende Flachdachaufbauten als hygrisch unbedenklich ein (Aufbau von außen nach innen):

- A) Schwarze PVC-Bahn - OSB - Zellulose - FADAB
- B) Schwarze PVC-Bahn - OSB - Zellulose - OSB
- C) Gründach - OSB - Zellulose - FADAB
- D) Schwarze PVC-Bahn - OSB - MIWO - FADAB

Folgender Flachdachaufbau ist gemäß Winter et al. bei der Planung einer detaillierten Untersuchung zu unterziehen:

- E) Schwarze PVC-Bahn - OSB - MIWO - OSB

Folgende Flachdachaufbauten werden nicht empfohlen:

- F) Gründach - OSB - Zellulose - OSB
- G) Gründach - OSB - MIWO - OSB
- H) Gründach - OSB - MIWO - FADAB

Winter et al. verwenden zur Tauglichkeitsbeurteilung der Flachdachkonstruktionen u.a. die Materialfeuchtegrenzwerte gemäß DIN 68800-2. Demnach darf das Konstruktionsholz eine Holzfeuchte von 20 M-% und die eingesetzte OSB eine Materialfeuchte von 18 M-% nicht überschreiten.

Sedlbauer et al. (2010) behandeln, neben der geschichtlichen Entwicklung, die statischen und materiellen Gesichtspunkte sowie die bauphysikalischen Anforderungen (Wärme-/Feuchte-/Schall- und Brandschutz), welche beim Bau von Flachdächern beachtet werden müssen. U.a. wird anhand von Messergebnissen und WUFI®-Simulationen die Notwendigkeit des Rücktrocknungspotentials für Dächer mit Dachabdichtung aufgezeigt. Der konvektive Feuchteeintrag und dessen Auswirkungen auf hölzerne Flachdachkonstruktionen mit Zwischensparrendämmung werden ebenfalls diskutiert. In den Konstruktionsbeispielen werden hölzerne Flachdächer mit Zwischensparrendämmung jedoch nicht aufgeführt. Der Fokus liegt hierbei auf mineralischen Dächern bzw. Dachkonstruktionen mit Dämmstoff und Abdichtung oberhalb der Tragstruktur.

## 2.4 Zulässige Materialfeuchten in Holzbauteilen

Um auf den chemischen Holzschutz von allseits verbaute Holz verzichten zu können, darf gemäß ÖNORM B 3802-2 eine Holzfeuchte von 20 M-% über die gesamte Gebrauchsdauer nicht überschreiten werden. Diese Holzfeuchte gilt gemäß Norm als Grenzwert für das Wachstum von holzerstörenden Pilzen.

Nach Viitanen (1996) kann dieser Grenzwert nicht bestätigt werden. Demnach liegt die minimal notwendige Holzfeuchte für holzerstörende Pilze bei etwa 24 M-% - 28 M-%. Schimmelpilze können gemäß Viitanen (1996) und Sedlbauer (2001) jedoch auch bereits bei Holzfeuchten unter 20 M-% auskeimen und wachsen. Die herrschende Temperatur hat ebenfalls einen starken Einfluss auf das Pilzwachstum, wie von Viitanen und Sedlbauer gezeigt wird.

Gemäß ÖNORM B 2215 darf Bauholz zum Zeitpunkt der Fertigstellung des Bauteils 18 M-% nicht überschreiten. Zur Sicherstellung dieses Grenzwertes sind elektrische Holzfeuchtigkeits-Messgeräte mit einer Messtoleranz von max.  $\pm 2$  M-% zu verwenden. Die reale Holzfeuchte kann zum Zeitpunkt der Fertigstellung somit bis zu 20 M-% betragen.

Zur Sicherung der Dauerhaftigkeit des Bauteils darf entsprechend DIN 68800-2 das Konstruktionsholz von zwischensparrenden Flachdachkonstruktionen eine Holzfeuchte von 20 M-% und die eingesetzte OSB eine Materialfeuchte von 18 M-% nicht überschreiten. Die Holzfeuchtemessung hat durch das elektrische Widerstandsmessverfahren zu erfolgen. Wie von Du et al. (1991) gezeigt wird, sind bei dieser Messmethode Abweichungen von bis zu  $\pm 2,5$  M-% möglich, was in realen Holzfeuchten von bis zu 22,5 M-% resultieren kann.

Carll und Wiedenhoef (2009) diskutieren anhand von diversen Literaturangaben maximale Materialfeuchten und Dimensionsstabilitäten von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen. Demnach sollte Bauholz eine Holzfeuchte von 20 M-% nicht überschreiten. Abgeleitet aus Sorptionskurven für Holz wird von Carll und Wiedenhoef anhand einer maximalen Holzfeuchte von 20 M-% der Grenzwert für die OSB-Materialfeuchte auf 17 M-% festgelegt

OSB weist nach der Herstellung Materialfeuchten von etwa 2 M-% bis 4 M-% auf [APA (2006); ÖNORM CEN/TS 12872]. Gemäß Sonderegger und Niemz (2003) liegt die differentielle Quellung (Prozent Längenänderung pro Prozent Materialfeuchteänderung) von 18 mm dickem OSB 3 im Bereich zwischen 35 % r.LF. und 80 % r.LF. bei 0,028 %/% (parallel zu den Strands) und 0,034 %/% (senkrecht zu den Strands). Für relative Luftfeuchtebereiche zwischen 80 % und 95 % liegt sie in beide Richtungen bei 0,011 %/%. Nach ÖNORM CEN/TS 12872 sind unabhängig des Luftfeuchtebereichs 0,02 %/% bzw. 0,03 %/% Dimensionsänderung anzusetzen.

Durch ungleichmäßige Quell- und Schwindbewegungen der außen- und innenseitigen Beplankung oder durch nicht vorhandene Bewegungsfugen, kann es während der Nutzung zu einer Wölbung des gesamten Bauteils oder Quetschungen der Beplankung kommen [Gonin et al. (2003); APA (2005); Gjinolli und Vogt (2006)].

## 2.5 Fazit

Die Literaturlauswertung zeigt, dass das Bewusstsein über die Problematik von Flachdächern mit fehlendem Rücktrocknungspotential deutlich gestiegen ist. In Dächern mit außen stark dampfbremsenden Schichten werden deshalb verstärkt feuchteadaptive Dampfbremsen eingesetzt. Experimentelle Untersuchungen hierzu wurden jedoch zumeist an Flachdächern mit Auflast/Aufdachdämmung [Kaufmann (1999); Künzel (1999b); Wakili, K. G.; Frank, T. (2003); Wakili und Frank (2004); Bludau et al. (2010a)] oder unbelüfteten Steildächern mit Metalldeckung [Künzel und Großkinsky (1998)] durchgeführt. Zwischensparrengedämmte hölzerne Flachdächer mit Dachabdichtung ohne Auflast wurden zumeist simulationsbasierend untersucht [Gonin et al. (2003); Häupl und Petzold (2007); Roßbach (2007); Bludau et al. (2008)]. Bei den experimentellen Untersuchungen dieser Dächer wurde der Einfluss einer Beschattung nur bedingt berücksichtigt oder die Klimate an der Gefachinnenseite nicht erfasst [Winter et al. (2009)].

Wie anhand der Literaturstudie ebenfalls zu erkennen ist, kommt dem konvektiven Feuchteeintrag in Leichtbaukonstruktionen eine steigende Bedeutung zu. Um diese Einträge rechnerisch zu berücksichtigen, werden unterschiedliche Leckagevolumenströme definiert [Janssens (1998); Zirkelbach et al. (2009); Hens (2010)]. Installationen, welche die innenseitige Luftdichtheitsschicht durchdringen, fließen als typische Leckageursache [Geißler (2001); Hall und Hauser (2003); Kalamees (2007)] jedoch nie direkt in die bestehenden Ansätze mit ein. Die ebenfalls maßgebenden Fertigungsbedingungen und Ausführungsqualitäten [Wilson, A. G. (1961); Kalamees (2007)] werden nur von Zirkelbach et al. (2009) teilweise mitberücksichtigt.

Die recherchierten Konstruktionsempfehlungen für flachgeneigte Dächer aus Holz [SVDW (2007); Holzabsatzfond (2008); Winter et al. (2009); Sedlbauer et al. (2010)] berücksichtigen weder vorhandene Beschattungssituationen noch spezifische konvektive Feuchteinträge. Es werden zumeist generelle Empfehlungen zur Konstruktion flachgeneigter Dächer ausgesprochen.

Bei der Beurteilung der Tauglichkeit von hölzernen Flachdächern wurde in der Vergangenheit häufig nicht zwischen der Materialfeuchtegrenze von Konstruktionsholz und Holzwerkstoffen wie z.B. OSB, unterschieden. Anhaltende 20 M-% der außenseitigen OSB ist zur positiven Beurteilung des Flachdachaufbaus zu hoch gewählt. Freiluftkonditionierte OSB erreichen im Sommer eine Ausgleichsfeuchte von etwa 9 M-%. Für ein Dachelement mit 10,00 m Länge und 2,50 m Breite (Strand-Orientierung quer) ergibt sich gemäß Sonderegger und Niemz (2003) beim Auffeuchten von 9 M-% auf 20 M-% eine Gesamtbreitenänderung der OSB-Beplankung von 0,5 cm und eine Längenänderung auf die gesamte Elementlänge von 2,4 cm. Gemäß Norm beträgt die Breitenänderung 0,6 cm und die Längenänderung sogar 3,3 cm. Solch starke Dimensionsänderungen der außenseitigen Beplankung können zu erhöhten Zwängen im Dach führen.

Abb. 2 zeigt Sorptionskurven für Holz und OSB aus Sonderegger und Niemz (2003); Fitz et al. (2004); Niemz et al. (2004); Niemz und Sonderegger (2009) und Carll und Wiedenhoef (2009). Gemäß den literaturbasierten Kennwerten liegt die OSB-Ausgleichsfeuchte bei Bedingungen, welche bei Vollholz eine Holzfeuchte von 20 M-% erzeugen, bei 17,6 M-%. Der OSB-Grenzwert gemäß Carll und Wiedenhoef (2009) kann demnach etwas überschritten werden, allerdings nicht bis auf 20 M-%. Bei dieser Ausgleichsfeuchte können nahezu Klimawerte erreicht werden, welche eine Auskeimung von holzerstörenden Pilzen im an der OSB anliegenden Vollholz ermöglichen (in Abhängigkeit der Einwirkdauer und Temperatur).

Eine OSB Materialfeuchte von 18 M-% sollte deshalb nicht ohne Berücksichtigung der Einwirkdauer, Temperatur und Konstruktion (Dehnungsfugen) überschritten werden.

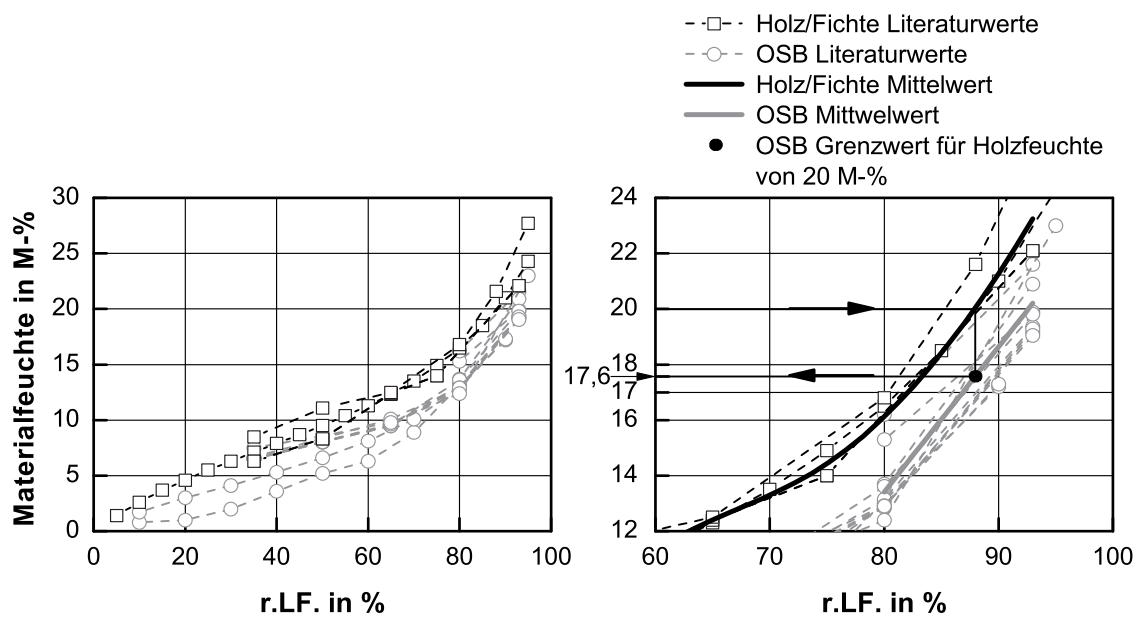


Abb. 2: Ausgleichsfeuchten von Holz/Fichte und OSB gemäß Literaturangaben aus Sonderegger und Niemz (2003); Fitz et al. (2004); Niemz et al. (2004); Niemz und Sonderegger (2009) und Carll und Wiedenhoef (2009) und die jeweils gemittelten Werte sowie der OSB-Grenzwert für maximale Holzfeuchten von 20 M-%

### **3 Experimentelle Analyse flachgeneigter Dachkonstruktionen**

Ziel der experimentellen Untersuchungen ist es, die bzgl. Schadensfreiheit maßgebenden Einflussfaktoren auf Flachdächer zu eruieren sowie die hygrothermischen Vorgänge in den verschiedenen Flachdachsystemen messtechnisch zu erfassen. Hierfür werden 16 Flachdachaufbauten, bestehend aus zehn unterschiedlichen Dachvarianten, auf ihr hygrothermisches Verhalten hin untersucht [Teibinger und Nusser (2010a)].

Die Dachelemente befinden sich auf zwei klimatisierten Forschungshäusern in Wien, wobei eines der beiden Häuser (Haus B) von einem Gitterrost aus 50 cm breiten, vertikalen OSB-Streifen überspannt wird [Nusser et al. (2008)]. Hierdurch wird die Dachfläche von Haus B durchgehend beschattet, wobei Niederschläge die Dachfläche dennoch erreichen.

Auf Haus A sind zehn unterschiedliche Flachdachaufbauten und auf Haus B nochmals sechs der zehn Dachaufbauten von Haus A montiert. Diese sechs Aufbauten werden somit bei besonnten und Vollzeit beschatteten Randbedingungen untersucht.

In den Aufsätzen I bis III im Anhang A.3 werden die Freilanduntersuchungen diskutiert und ausgewertet. Nachfolgend werden diese Aufsätze zusammenfassend wiedergegeben und ergänzt.

#### **3.1 Versuchsaufbauten und Messtechnik**

Abb. 3 zeigt die Aufteilung der Dachfläche und die Aufbauten der verschiedenen, industriell gefertigten Dachaufbauten. Die außenseitig eingesetzte schwarze EPDM-Dachbahn weist gemäß Herstellerangaben einen  $s_d$ -Wert von 87 m auf. Als Wärmedämmung wurde Glaswolle mit  $\lambda_D = 0,038 \text{ W/(m.K)}$  eingesetzt.

Um eine Interaktion der einzelnen Dachaufbauten untereinander, z.B. durch Kapillartransport zwischen den Gefachen, zu unterbinden – dieser Effekt wird von Künzel und Großkinsky (1998) beschrieben – werden alle Versuchsdachaufbauten als eigenständige Dachelemente gefertigt und die Außenkanten der Randsparren mit einer PE-Folie hygrisch abgesperrt.

In Abb. 4 sind die Messpositionen zum Erfassen der klimatischen Bedingungen und Materialfeuchten im Gefach dargestellt.

Weitere Details zu den Dachaufbauten und eingesetzten Materialien können Tab. A-1 bis Tab. A-10 in Anhang A.1 entnommen werden. Angaben zu den herrschenden Klimabedingungen und  $s_d$ -Werten der eingesetzten FADABs können dem Aufsatz I im Anhang A.3.1 entnommen werden.

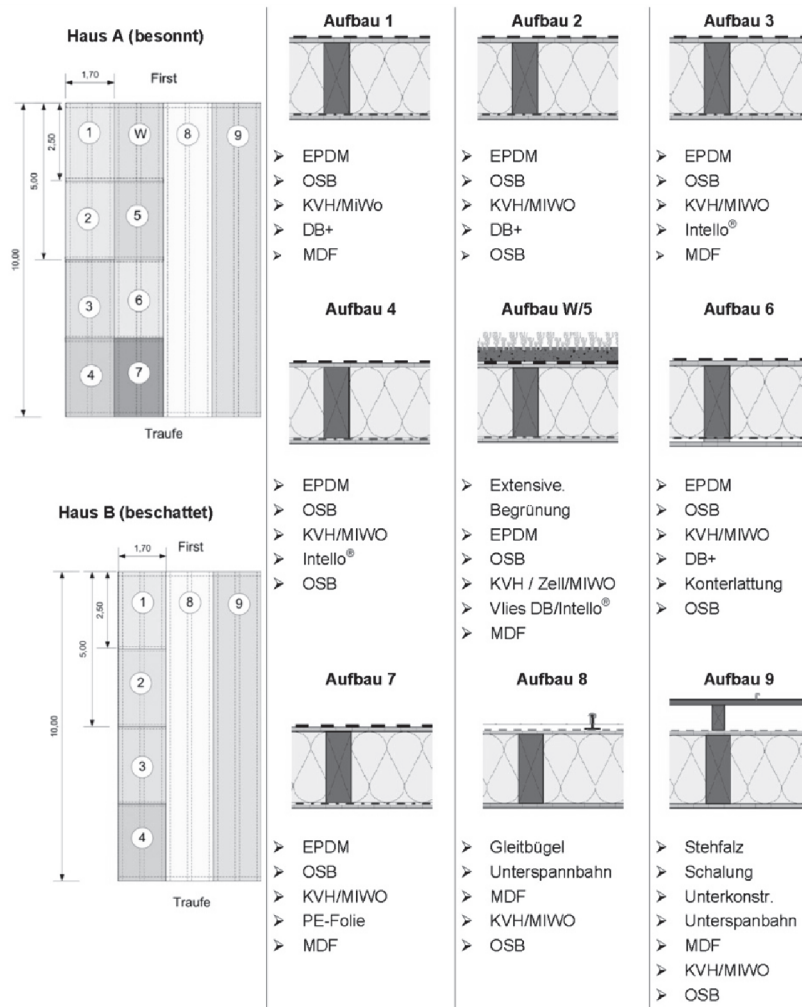


Abb. 3: Dachaufteilung der beiden Forschungshäuser A und B und Übersicht der geprüften Dachaufbauten

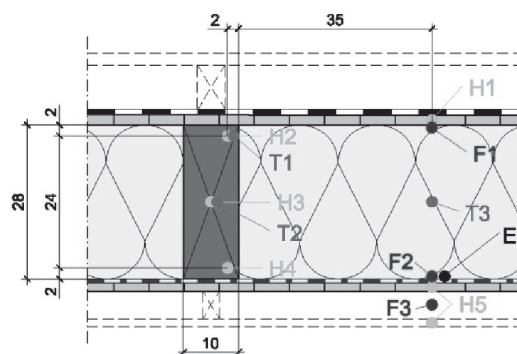


Abb. 4: Schematische Darstellung der Messpositionen im Gefach der untersuchten Dachelemente. H1...H5 = Materialfeuchte; F1...F3 = relative Luftfeuchte/Temperatur; T1....T3 = Temperatur; E = Tracergas

Die Materialfeuchtemessung erfolgt über das el. Widerstandsverfahren. Abb. 5 zeigt den Einfluss der Temperatur auf die Materialfeuchtemesswerte beim verwendeten Messverfahren. Wie sich zeigt, sinkt die Materialfeuchte mit steigender Messtemperatur (Spannung bzw. Widerstand konstant), wodurch eine Temperaturkompensation notwendig wird.

Die Materialfeuchten der OSB entsprechen fichteäquivalenten Holzfeuchten und können lediglich zur Orientierung herangezogen werden. Obwohl das verwendete Holzfeuchtemessgerät regelmäßig kalibriert wird und Vergleichsmessungen mit einem baugleichen Holzfeuchtemessgerät zwischen elektrischer Widerstandsmessung und Darrprobe eine Differenz von max.  $\pm 1,0$  M-% absolut zeigt (Zielfeuchte 12,7 M-%), dienen auch die Messwerte der Fichtesparren eher der Orientierung. Abweichungen von bis zu  $\pm 2,5$  M-% bei hohen bzw. niederen Materialfeuchten sind bei dieser Messmethode auch bei auf die Holzart kalibrierten Widerstandskennlinien möglich Du et al. (1991).

Die Luftdichtheit der Dachelemente wird mit Hilfe von Tracergassensoren in den Gefachen überprüft. Hierfür wird Ethanol in den Forschungsgebäuden zerstäubt und mit Hilfe einer Blower-Door-Anlage ein Überdruck von 50 Pa im Gebäude erzeugt. Anhand der Sensorreaktionen lässt sich die Luftdichtheit der Dachelemente qualitativ beurteilen.

Zur Klimaerfassung im Gefach werden kapazitive Luftfeuchtesensoren mit Thermistoren und Thermoelemente eingesetzt.

Details zu der eingesetzten Messtechnik können Tab. A-11 in Anhang A.2 entnommen werden.

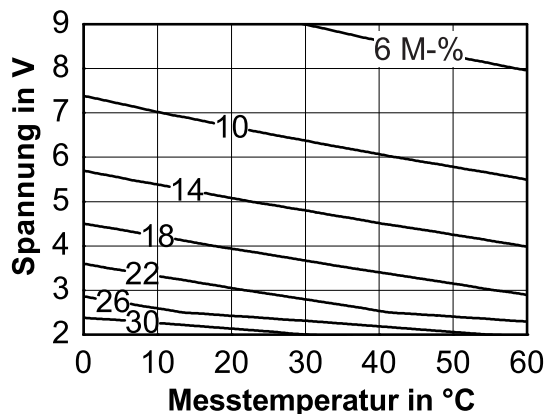


Abb. 5: Abhängigkeit der Materialfeuchte von der Messtemperatur beim verwendeten elektrischen Widerstandsmessverfahren (Spannung bzw. Widerstand konstant)



### 3.2 Erkenntnisse zu Foliendächern

Wie sich zeigt, hängt die Tauglichkeit eines hölzernen Flachdaches mit außenseitiger Dachabdichtung wesentlich von der sommerlichen Rücktrocknung ab. Hierfür sind hohe Temperaturen auf der Dachbahn bzw. im Gefach notwendig. Die beschatteten Foliendachelemente weisen aufgrund der somit fehlenden Rücktrocknung sehr hohe und lang anhaltende r.LF. im Gefach auf (> 80 % r.LF. während 45 % des Jahres). Auch die Materialfeuchte der außenseitigen OSB-Beplankung liegt bei diesen Dachelementen teilweise im kritischen Bereich (> 20 M-%).

Abb. 6 verdeutlicht, wie sich eine Beschattung auf die Rücktrocknung auswirkt. In den oberen Grafiken sind die Wasserdampfpartialdrücke an der Gefachinnenseite in den besonnten und beschatteten Dachelementen sowie im Innenraum der Forschungshäuser aufgeführt. Die Partialdruckdifferenz zwischen Raum und Gefachinnenseite sowie die integrale Betrachtung dieser sind im unteren Teil aufgetragen. Eine negative Partialdruckdifferenz deutet auf eine mögliche Rücktrocknung hin.

Es ist zu erkennen, dass es durch die Besonnung deutlich häufiger zu einem möglichen Diffusionsstrom in den Innenraum kommt, als bei einer beschatteten Dachfläche. Bei der integralen Betrachtung der Partialdruckdifferenzen wird deutlich, dass bei konstanten innenseitigen Diffusionswiderständen die in die beschatteten Dachelemente diffusiv eingedrungene Feuchtigkeit aufgrund der durchwegs positiven Diffusionsstrombilanz nicht nach innen abtrocknen kann. Bei den besonnten Dachelementen ist dies möglich.

Aufgrund der sommerlichen Feuchteumverteilung von der Gefachaußen- zur Gefachinnenseite kann es auf der Dampfbremse zu Sommerkondensat kommen. Mit Hilfe einer innenseitigen Installationsebene ist es möglich, den Feuchtestau auf der Dampfbremse etwas zu reduzieren, wodurch das Sommerkondensat ggf. vermieden wird.

Über das Jahr betrachtet sind die in den besonnten Dachelementen an der Dampfbremse anliegenden Klimabedingungen in Bezug auf biologisches Wachstum deutlich kritischer als an der außenseitigen Beplankung. Dennoch konnte in keinem Gefach – auch nicht auf einem an der Dampfbremse angebrachten Streifen MDF – ein Befall von Schimmel festgestellt werden.

Ein zusätzlicher innenseitiger Diffusionswiderstand durch eine OSB-Beplankung anstelle einer MDF wirkt sich bei den besonnten Dachelementen aufgrund der reduzierten Rücktrocknung etwas negativ aus, wohingegen die beschatteten Dachelemente aufgrund des höheren innenseitigen Diffusionswiderstandes davon profitieren. Die Unterschiede sind durch den relativ kurzen Beobachtungszeitraums (17 Monate) jedoch gering. Ebenso zeigen sich tendenzielle Unterschiede bei Verwendung einer FADAB mit deutlich höherer/geringerer Spreizung im  $s_d$ -Wert Verlauf. Durch die Verwendung einer FADAB mit höherer Spreizung werden geringere Luftfeuchten in den Gefachen erreicht.

Es können ebenfalls Unterschiede zwischen den traufseitigen und den firstseitigen Luftfeuchten in den Gefachen festgestellt werden. Dies deutet auf vorhandene Rotationsströmungen im Gefach der Flachdachaufbauten hin, wobei die Unterschiede in den besonnten Elementen deutlich stärker ausgeprägt sind als in den beschatteten Dächern.

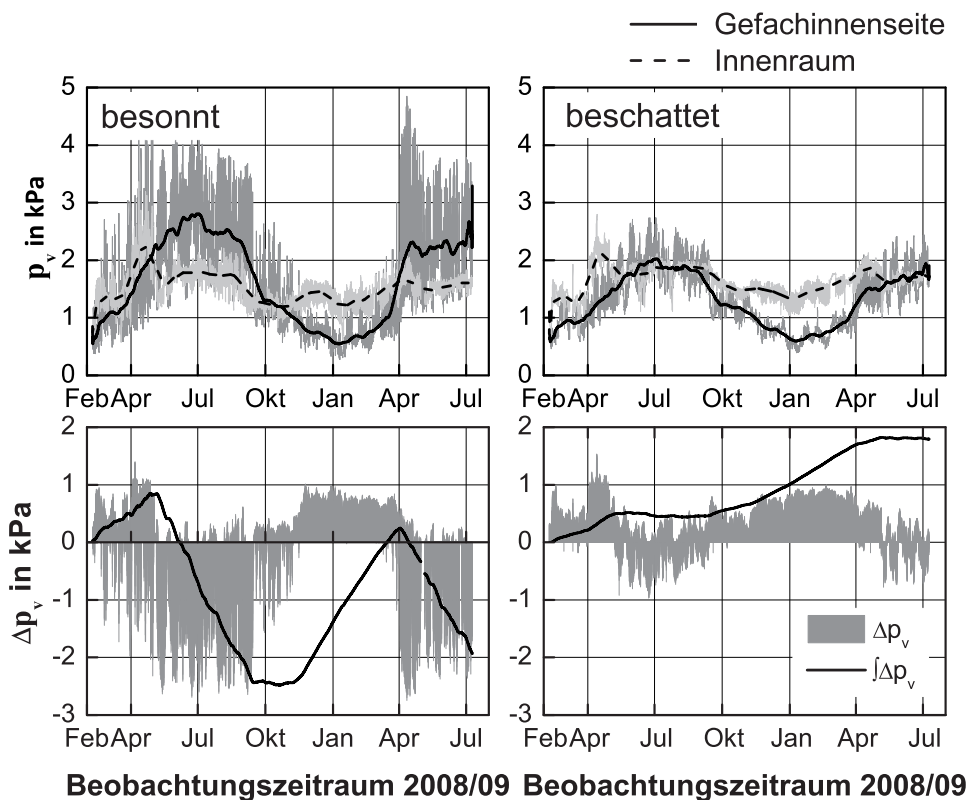


Abb. 6: Oben: Darstellung des Wasserdampfpartialdrucks in den besonnten und beschatteten Dachelementen sowie im Innenraum der Forschungshäuser<sup>1</sup>  
 Unten: Partialdruckdifferenz zwischen Raum und Gefachinnenseite sowie die integrale Betrachtung dieser. Positive Partialdruckdifferenz bedeutet Diffusionsstrom vom Innenraum in das Gefach

Um das Aufwechungs- und Austrocknungsverhalten der Dachkonstruktionen zu untersuchen wird in beiden Gebäuden im April 2008 eine erhöhte Feuchtelast ( $\varphi \sim 75\% - 80\%$ ) und erhöhte Temperaturen im Innenraum eingestellt. Aufgrund des hohen fixen Diffusionswiderstandes der PE-Folie ist die hohe Raumluffteuchte während der Aufwechungsphase zur Erhöhung der Materialfeuchte in Element A7 jedoch nicht zielführend. Aus diesem Grund werden die Revisionsklappen in diesem Element im April 2008 für 19 Tage geöffnet, wodurch eine Materialfeuchteerhöhung entsprechend den Foliendächern mit FADAB erreicht wird.

Abb. 7 zeigt den Materialfeuchteverlauf in dem Dachelement mit PE-Folie ( $s_d > 100\text{ m}$ ) als Dampfbremse (Element A7) und den Mittelwert aus den Dachelementen mit FADAB.

<sup>1</sup> Die Messwerte der Aufbauten 1-4 werden hierfür gemittelt.

Wie anhand der Grafik zu erkennen ist, liegen die mittleren Materialfeuchten in Element A7 im Zeitraum nach der Auffeuchtungsphase an allen Positionen über jenen in den Elementen mit FADAB. Vor allem an den äußeren Messpositionen ist eine Rücktrocknung der erhöhten Materialfeuchte in Element 7 kaum zu erkennen. In den Elementen mit FADAB zeigt sich die Rücktrocknung deutlich ausgeprägter.

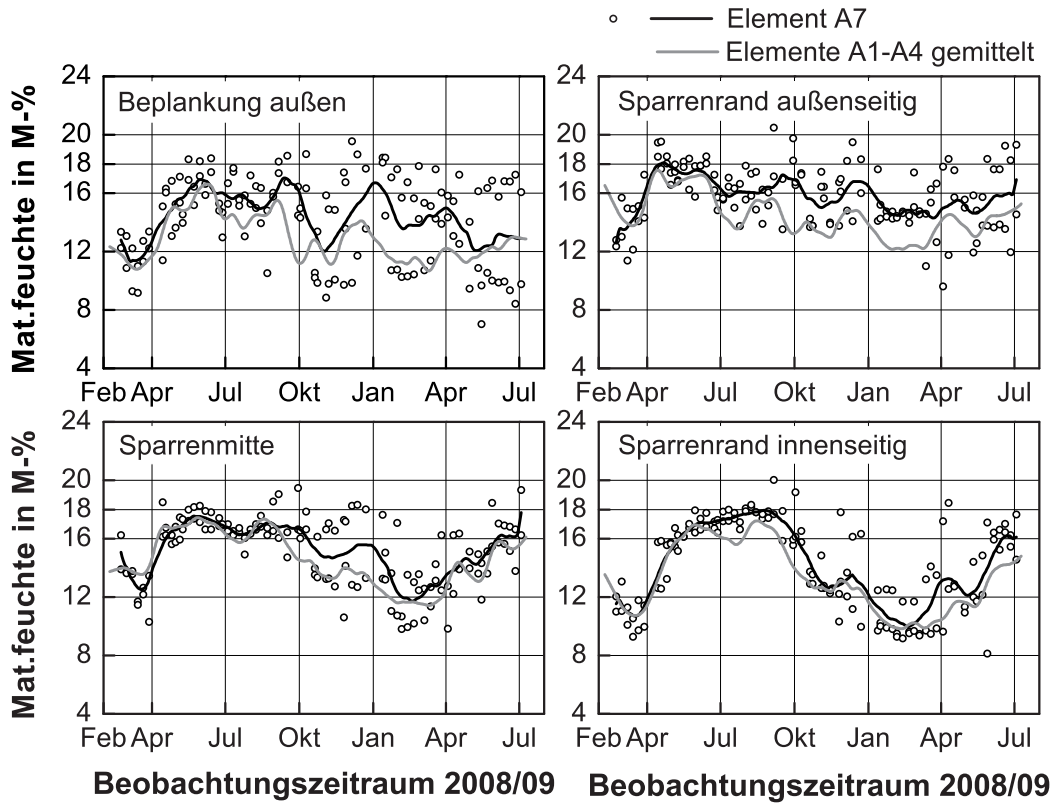


Abb. 7: Materialfeuchten (Wochenmesswerte und gleitende Monatsmittelwerte) im Foliendachelement mit PE-Dampfbremse (A7) und der Mittelwert aus den Foliendachelementen mit FADAB (A1 bis A4)



### 3.3 Erkenntnisse zu Gründächern

Die durchgeführten Freilanduntersuchungen an Gründächern zeigen, dass die Dachhauttemperatur der Gründächer im Winter deutlich vom Niederschlag und der Dauer der vorhandenen Temperaturen abhängt. Bei einer Durchfrostung des Substrats sind auch Temperaturen an der Dachhaut unterhalb des Gefrierpunktes möglich.

Während der Sommermonate hängt die Dachhauttemperatur neben den Witterungsbedingungen vom Bewuchsgrad des Daches ab. So wird die Dachhaut eines dicht bewachsenen Gründaches nur geringfügig durch die Sonneneinstrahlung erwärmt. Bei einem dünn-schichtigen Leichtsubstrat und positiven Lufttemperaturen orientiert sich die Dachhauttemperatur im Gründach stark an der Außenlufttemperatur. Aufgrund der dadurch nur gering vorhandenen Umkehrdiffusion kommt es im Jahresverlauf zu einer Feuchteakkumulation im Dach. Während der Wintermonate stellt sich an der Gefachaußenseite aufgrund dessen eine lang andauernde, hohe r.LF. ein ( $> 80\%$  r.LF. während  $52\%$  des Jahres), welche dort zu erhöhten Materialfeuchten führt ( $20\text{ M-\%}$ ).

Im Vergleich zur Mineralwolle besitzt Zellulose stark sorptive Eigenschaften [Montensen-Hedegaard et al. (2005)], wodurch sich geringere Materialfeuchten im Gefach einstellen, was auch Untersuchungen in Winter et al. (2009) zeigen. Bei vorhandenen Leckagen in der innenseitigen Luftdichtheitsschicht kommt es jedoch ggf. zu einer Auffeuchtung der Zellulose und zu deutlich höheren Materialfeuchten als die hier gemessenen [Derome (2005)].

Trotz der gemäß Hukka und Viitanen (1999) in den Gefachen sehr häufig vorkommenden positiven Schimmelwachstumsbedingungen kann weder in dem Gründachelement mit Zellulosedämmung noch in jenem mit Mineralwolle Schimmel entdeckt werden.



### 3.4 Erkenntnisse zu metallgedeckten Dächern

Die untersuchten metallgedeckten Dächer verhalten sich in hygrischer Hinsicht günstig. Es zeigt sich, dass eine Dampfbremsbahn bei diesen Dächern nicht zwingend erforderlich ist. Bei einem beschattungsfreien Dach und geeigneter Eindeckung bzw. Hinterlüftung kann die innenseitige OSB als Dampfbremse ausreichen.

Eine Eindeckung mit Gleitbügelblechen entsprechend der untersuchten Dächer ermöglicht einen quasi diffusionsoffenen Aufbau. Aus dem Gefach nach außen diffundierende Feuchtigkeit kann bei den untersuchten Dachkonstruktionen mit Gleitbügelblecheindeckung entweichen. Dass sich eine Reduktion des Abstandes zwischen Metallbahn und außenseitiger Beplankung, z.B. durch hohe Schneelast oder Verformungen negativ auf das hygrische Verhalten des Dachelements auswirkt, kann nicht ausgeschlossen werden.

Das hinterlüftete Dach zeigt bei den gegebenen Versuchsbedingungen sowohl in Bezug auf das Klima im Gefach wie auch im Hinblick auf die dortigen Materialfeuchten das günstigste Verhalten. Trotz einer dauerhaften Beschattung und des dadurch geringen Luftvolumenstroms in der Hinterlüftungsebene konnten in dem beschatteten hinterlüfteten Dach keine erhöhten Materialfeuchten und nur äußerst selten positive Schimmelwachstumsbedingungen festgestellt werden. Auch in der Hinterlüftungsebene konnte kein Feuchtestau verzeichnet werden.

Wie auch in den EPDM-Foliendächern, so zeigen sich in den metallgedeckten Dächern erhöhte Luftfeuchten auf der Firstseite, was auf Rotationsströmungen im Gefach hindeutet.

Wie die Luftdichtheitsmessungen mit Tracergas an den Versuchsdächern gezeigt haben, weisen die Dachelemente mit Metalleindeckung, welche als Dampfbremse lediglich eine OSB besitzen, eine geringere Luftdichtheit auf, als jene Elemente in denen eine Dampfbremsbahn verwendet wird (vgl. Bild 4 in Aufsatz III im Anhang).



### 3.5 Fazit

Anhand der gewonnenen Messergebnisse können die untersuchten Dachvarianten nach abnehmender hygrischer Robustheit folgendermaßen gereiht werden:

- A) Hinterlüftete Dächer
- B) Dächer mit Gleitbügelblecheindeckung
- C) Foliendächer ohne Auflast
- D) Gründächer

Die untersuchten metallgedeckten Dächer verhalten sich hierbei aufgrund ihres quasi diffusionsoffenen Aufbaus deutlich günstiger als die untersuchten Dächer mit Abdichtung. Vor allem bei Dachkonstruktionen mit funktionierender Hinterlüftung ist der Diffusionsstrom in die Hinterlüftungsebene und der dortige Feuchteabtransport ausreichend, um eine schädliche Feuchteakkumulation im Dach zu verhindern.

Die Schadensfreiheit von außenseitig abgedichteten hölzernen Flachdächern hängt hingegen maßgeblich von ihrem Rücktrocknungspotential ab. Hierfür sind im Sommer erhöhte Temperaturen im Gefach und möglichst geringe innenseitige Diffusionswiderstände notwendig. Eine Beschattung der Dachfläche, sehr geringe solare Absorptionskoeffizienten der Dachbahn oder Dampfbremsen mit fixem hohem  $s_d$ -Wert wirken sich deshalb äußerst negativ auf den Feuchtehaushalt und somit auf die Dauerhaftigkeit von hölzernen Dächern mit Abdichtung aus. Gründächer zeigen ein ähnlich kritisches Verhalten wie Vollzeit beschattete Foliendächer.



## **4 Neue Ansätze zur Berücksichtigung wichtiger Einflussfaktoren**

Wie in den vorhergehenden Abschnitten gezeigt wird, hängt die Funktionstauglichkeit von flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen mit außenseitiger Abdichtung im Wesentlichen von ihrem Rückrocknungspotential ab.

Der Grad der notwendigen Rückrocknung wird wiederum von der Feuchtelast auf das Bauteil bestimmt, welche neben den klimatischen Bedingungen von der Ausprägung des konvektiven Feuchteintrags beeinflusst wird.

Nachfolgend werden neue Ansätze zur Berücksichtigung des konvektiven Feuchteintrags und des, durch eine Beschattung der Dachfläche, reduzierten Rückrocknungspotentials vorgestellt.

### **4.1 Konvektive Feuchteinträge**

Eine der typischen Gründe für eine geringe Luftdichtheit von Gebäuden und konvektionsbedingte Feuchteschäden liegt neben ungenügend dichten Bauteilanschlüssen häufig bei den Elektroinstallationen [Fuhrmann (2003); Hall und Hauser (2003); Mattsson (2007); Kalamees et al. (2008)].

Nachfolgend wird ein Ansatz vorgestellt, welcher es ermöglicht, konvektive Feuchteinträge in Dächer unter Beachtung von Fertigungs- und Montagebedingungen sowie der Ausführungsqualität zu quantifizieren. Anhand von Simulationen wird abschließend aufgezeigt, wie sich konvektive Feuchteinträge auf den Feuchtehaushalt hölzerner Flachdächer mit Dachabdichtung auswirken.

#### **4.1.1 Ansatz zur Quantifizierung konvektiver Feuchteinträge**

Zur Quantifizierung des konvektiven Feuchteintrags in die Konstruktion aufgrund von Leckagen an der innenseitigen Luftdichtheitsschicht, werden die Baupläne von 50 Einfamilienhäusern (EFH) mit insgesamt 646 Räumen bezüglich ihrer Elektroinstallationen und anderweitigen Durchdringungen ausgewertet. Die Gebäude wurden größtenteils im Jahr 2008 errichtet, was Abb. 8 zeigt. Bei den untersuchten Gebäuden handelt es sich durchwegs um Holzrahmenbaukonstruktionen von fünf großen österreichischen Fertighausunternehmen.

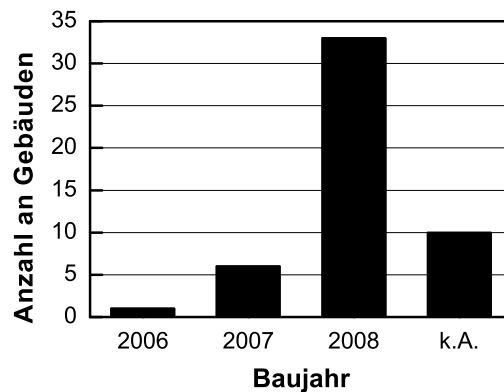


Abb. 8: Altersprofil der 50 ausgewerteten Einfamilienhäuser

Aufgrund des u.a. höhenabhängigen thermischen Auftriebs und der dadurch entstehenden Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich verursachen Leckagen im Dachbereich während den Wintermonaten sehr hohe Luft-Exfiltrationsströme in das Bauteil.

Zunächst werden deshalb die Decken und Dächer von 531 Räumen auf die Anzahl von Lichtkabelausschlüssen hin untersucht. Heizungs- und Lüftungsinstallationen, Telekommunikationsleitungen oder auch Steckdosen stellen nur einen geringen Anteil an Durchdringungen in den ausgewerteten Decken und Dächern dar und werden nicht beachtet. Die Anzahl der Lichtkabelausschlüsse wird in  $\text{m}^2$  Raumgrundfläche angegeben.

Wie Abb. 9 entnommen werden kann, liegt das 95%-Quantil an Lichtkabelausschlüssen in Decken/Dächern pro  $\text{m}^2$  Raumgrundfläche bei  $0,48 \text{ m}^2$ .

Neben den Lichtkabelausschlüssen in den Decken und Dächern werden auch potentielle Durchdringungen der innenseitigen Luftdichtheitsschicht in den Außenwänden erfasst.

Insgesamt werden folgende potentielle Leckageursachen ausgewertet:

- I. Lichtkabelausschlüssen in Decken und Dächern
- II. Heizung-/ Klima-/Sanitärinstallationen
- III. Stromkabelausschlüsse
- IV. Lichtschalter u.ä.
- V. Steckdosen
- VI. Telekommunikationsanschlüsse
- VII. Sonstige Elektroinstallationen (z.B. Verteilerdosen, etc.)

Abb. 9 zeigt ebenfalls die Häufigkeiten der potentiellen Leckagen pro  $\text{m}^2$  Wandfläche (Leckageursachen II-VII). Es werden hierfür insgesamt 445 Räume mit durchdringungsbehafteten Außenwänden ausgewertet und eine mittlere Raumhöhe von 2,60 m vorausgesetzt. Räume ohne Durchdringung in der Außenwand fließen nicht in die Auswertung mit ein.

Wie zu erkennen ist, sind bei einer Leckagedichte von  $0,48 \text{ m}^2$  die 95 %-Quantile aller erfassten potentiellen Leckagen inbegriffen.

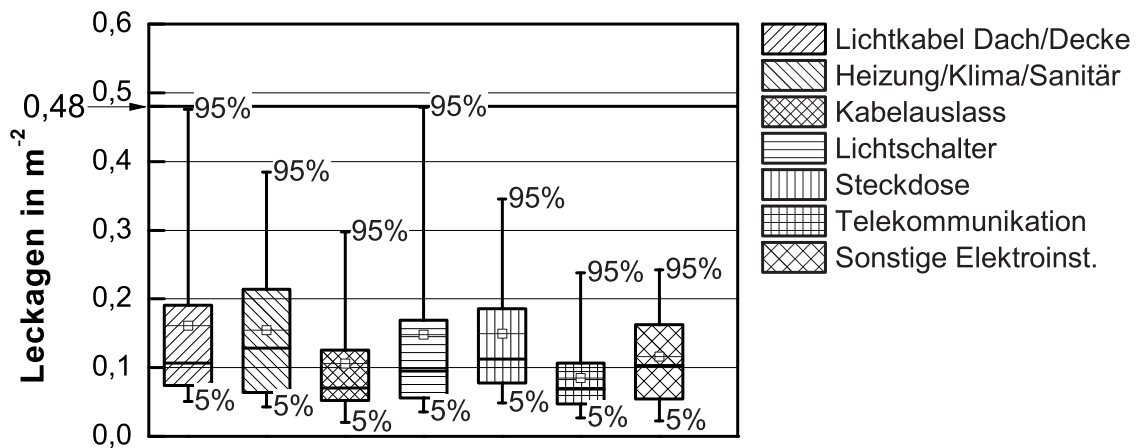


Abb. 9: Potentielle Leckagen pro m<sup>2</sup> Grund-/Wandfläche in den Decken/Dächern und Außenwänden von 50 Einfamilienhäusern

Hall und Hauser (2003) untersuchen in ihrer Arbeit u.a. den Luftvolumenstrom bei verschiedenen Druckdifferenzen durch ein nicht abgeklebtes Elektrokabel entsprechend Abb. 10.



Abb. 10: Nicht abgeklebte Durchdringung eines Elektrokabels durch die Dampfbremse [Hall und Hauser (2003)]

Unter der Annahme, dass die gemäß Abb. 9 erfassten Leckagen verallgemeinert durch ein solch nicht abgeklebtes Elektrokabel repräsentiert werden können, beschreibt Gleichung (4.1) den Leckagevolumenstrom bei einer Kabelauslassdichte von 0,48 m<sup>2</sup>. Hierfür wird der für Spalt- und Rissleckagen typische Strömungsexponent von 2/3 verwendet [Hens (2007); Mattsson (2007); Richter et al. (2008)]. Abb. 11 zeigt den an die Messwerte von Hall und Hauser angepassten Verlauf der Leckagevolumenstromfunktion.

$$Q = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P^{2/3} \quad (4.1)$$

- Q Leckagevolumenstrom in m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>.s)
- ΔP Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa

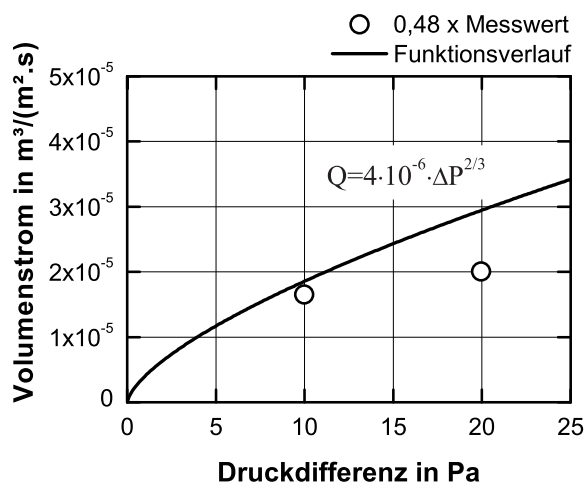


Abb. 11: An Messwerte von Hall und Hauser (2003) angepasste Leckagevolumenstromfunktion für ein nicht abgeklebtes Elektrokabel bei einer Leckagedichte von 0,48 m<sup>-2</sup>

Zur Quantifizierung möglicher Luftleckagen müssen auch die Fertigungsbedingungen und die Ausführungsqualität bedacht werden, wie die Erhebungen von Kalamees (2007) zeigen. Unter Baustellenbedingungen gefertigte Konstruktionen sind anfälliger für Luftleckagen als im Werk unter optimierten Bedingungen vorgefertigte Elemente. Ebenso wird durch eine Blower-Door-Messung mit Leckageortung die Wahrscheinlichkeit von unentdeckten Leckagen verringert, was Bachinger (2010) zeigt.

Zur Berücksichtigung dieser Faktoren wird der Luftdichtheitsfaktor  $F_a$  eingeführt. Gleichung (4.1) wird dementsprechend erweitert:

$$Q = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P^{2/3} \cdot F_a^{-1} \tag{4.2}$$

- Q Leckagevolumenstrom in m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·s)
- ΔP Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa
- F<sub>a</sub> Luftdichtheitsfaktor

Durch den Luftdichtheitsfaktor werden in Anlehnung an die Luftdichtheitsklassen gemäß Zirkelbach et al. (2009) vier Luftdichtheitsklassen (LDK) für flachgeneigte hölzerne Dachelemente definiert, welche in Tab. 1 aufgeführt sind. Den vorgefertigten Dachelementen (LDK A+) wird demnach der geringste Leckagevolumenstrom zugeordnet. Jenen Dachelementen mit den geringsten Anforderungen (LDK C) wird hingegen der höchste Leckagevolumenstrom zugeordnet. Dachelemente der LDK A+ können im Vergleich zu den Elementen der restlichen LDKs das geringste Rücktrochnungspotential aufweisen, weshalb bei diesen Elementen ein besonderes Augenmerk auf eine geringe Einbaufeuchte gelegt werden muss. Durch die Forderungen nach einer vorgefertigten Bauzeitenabdichtung wird das Risiko der Auffeuchtung während der Bauphase reduziert. Zusätzlich wird durch die geforderte Überprüfung der Materialfeuchten (z.B. durch ÜA- bzw. CE-Kennzeichnung des Bauteils) der Einbau von trockenen Baustoffen sehr wahrscheinlich.

Tab. 1: Definition der Luftdichtheitsklassen (LDK) für Dachelemente mit zugehöriger Gebäudeluftdichtheit  $n_{50}$  und Luftdichtheitsfaktor  $F_a$

LDK	A+	A	B	C
Definition	- Dachelement vorgefertigt - Dampfbremssfolie und beidseitige Beplankung - vorgefertigte Bauzeitenabdichtung - geprüfte Materialfeuchten (z.B. durch ÜA- od. CE-Kennzeichnung) - Durchdringungen mit Manschetten oder eingehaust	- Durchdringungen mit Manschetten oder eingehaust - Blower-Door inkl. Leckageortung	- Durchdringungen mit Manschetten oder eingehaust - Blower-Door inkl. Leckageortung	- Luftdichtheit nach Stand der Technik
$n_{50}$	nicht gemessen	$\leq 1.5 \text{ h}^{-1}$	$\leq 3.0 \text{ h}^{-1}$	nicht gemessen
$F_a$	8	4	2	1

#### 4.1.2 Auswirkung konvektiver Feuchteinträge

Um den Einfluss der konvektiven Feuchteinträge zu untersuchen, werden numerische 1-D Simulationen mit WUFI® Pro V.5.1 durchgeführt. Ab WUFI® Pro V.5 können konvektive Feuchteinträge durch den Ansatz von Zirkelbach et al. (2009) berücksichtigt werden. Trocknungsfördernde Luftvolumenströme vom Gefach in den Innenraum, wie sie während der Sommermonate auftreten können, werden durch WUFI® nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse liegen somit „auf der sicheren Seite“.

Abb. 12 zeigt einen Vergleich der Leckagevolumenströme durch die hier definierten Luftdichtheitsklassen und durch jene gemäß Zirkelbach et al. (2009). Die linke Grafik zeigt die Luftvolumenströme bis zu einer Druckdifferenz von 50 Pa, die rechte Grafik zeigt jene für die im Hausbau eher relevante thermisch induzierte Druckdifferenz bis 7 Pa.

Wie in der rechten Grafik zu erkennen ist, liegen die Volumenströme in den durch die oben definierte LDK zumeist etwas über den Volumenströmen nach Zirkelbach et al. Die Volumenströme durch die LDK B und der Klasse B nach Zirkelbach et al. zeigen in den Druckdifferenzen zwischen 5 Pa und 7 Pa jedoch nur geringe Differenzen. Durch die LDK A+ werden etwas geringere Luftvolumenströme erzeugt als durch die Klasse A nach Zirkelbach et al.

Bei höheren Druckdifferenzen (linke Grafik in Abb. 12), welche z.B. durch Überlagerung der Windsogkräfte, des thermischen Auftriebs und des Überdrucks durch Luftinfiltration auftreten können [Etheridge und Sandberg (1996); TenWolde et al. (1998); Djebbar et al. (2003); Schmidt und Kornadt (2010)], übersteigen die Volumenströme durch den linearen Ansatz von Zirkelbach et al. (2009) jene aus dem oben definierten exponentiellen Ansatz.

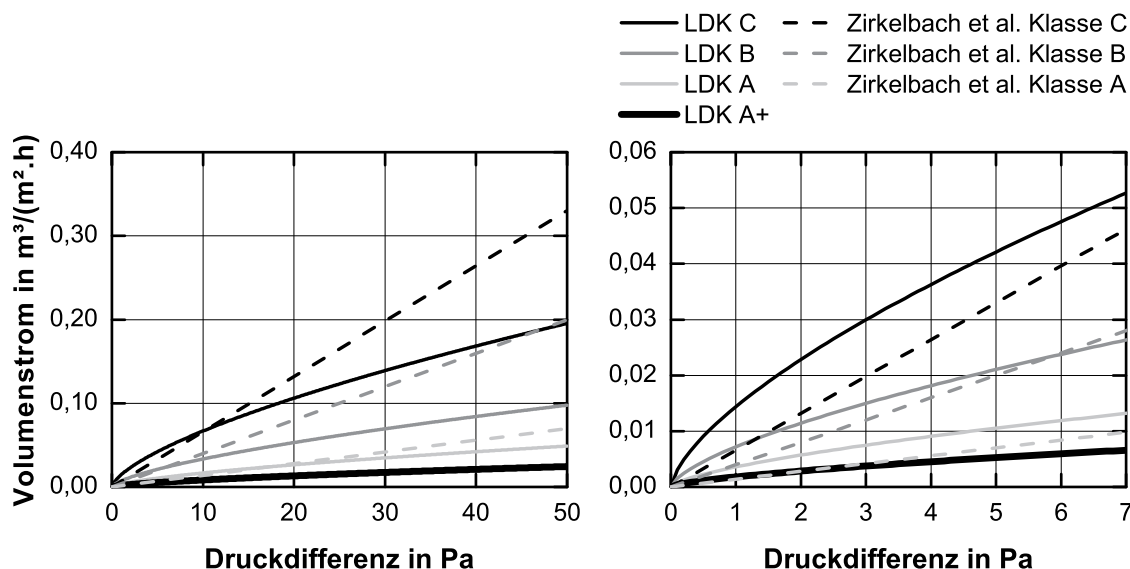


Abb. 12: Vergleich der Leckagevolumenströme durch die vier definierten Luftdichtheitsklassen (LDK A+ bis C) mit den Klassen von Zirkelbach et al. (2009)

Für die Simulationen wird der  $Q_{50}$ -Wert in WUFI<sup>®</sup> dahingehend verändert, dass die in WUFI<sup>®</sup> hinterlegte lineare Volumenstromfunktion die Potenzfunktion nach Gleichung (4.2) geeignet schneidet. Als Schnittpunkt wird eine gemäß Gleichung (4.3) (aus Hens (2007)) errechnete winterliche Druckdifferenz festgelegt.

$$\Delta P = 0,0215 \cdot h \cdot (T_i - T_e) \tag{4.3}$$

- $\Delta P$  Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa
- $h$  Höhe des zusammenhängenden Luftraums im Innenraum in m
- $T_i$  Lufttemperatur im Innenraum in K
- $T_e$  Lufttemperatur im Außenbereich in K

Abb. 13 links zeigt beispielhaft die Druckdifferenz aufgrund des thermischen Auftriebs nach Gleichung (4.3) in einem Gebäude in Holzkirchen (D) mit einer Innentemperatur von  $(21 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$  und einem maximalen zusammenhängenden Luftraum von 8 m Höhe. Die rechte Grafik in Abb. 13 zeigt die Volumenstromfunktionen der LDK A+ bis C und die angepassten WUFI<sup>®</sup> Funktionen. Zur Anpassung der WUFI<sup>®</sup>-Funktionen an die LDK A+, A und B wird jeweils ein Schnittpunkt bei einer Druckdifferenz von 5 Pa gewählt (siehe Abb. 13 links). Zur Anpassung an die LDK C wird ein Schnittpunkt bei 5,3 Pa gewählt. Die so gewählten Schnittpunkte resultieren in  $Q_{50}$ -Werten in WUFI<sup>®</sup> entsprechend Tab. 2.

Wie sich anhand der rechten Grafik in Abb. 13 zeigt, sind die Differenzen zwischen den Luftvolumenströmen der beiden Ansätze für die relevanten winterlichen Druckdifferenzen nun sehr gering.

Tab. 2:  $Q_{50}$ -Werte in WUFI® zur Anpassung der beiden Leckagevolumenstromfunktionen für ein Gebäude am Standort Holzkirchen (D), Innentemperatur ( $21 \pm 1$ ) °C, Raumhöhe 8 m

LDK	WUFI® $Q_{50}$ -Wert in $m^3/(m^2 \cdot h)$
A+	0,79
A	1,58
B	3,16
C	6,19

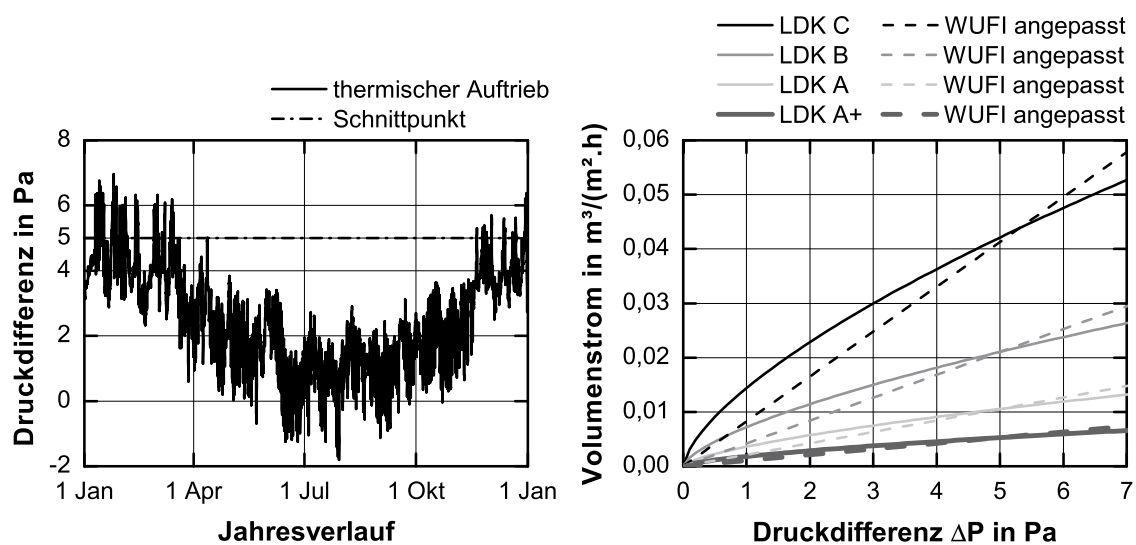


Abb. 13: Links: Druckdifferenz aus thermischem Auftrieb (Standort Holzkirchen (D), Innentemperatur ( $21 \pm 1$ ) °C, Raumhöhe 8 m) und Schnittpunkt zur Anpassung der WUFI® Volumenstromfunktionen  
 Rechts: Volumenstromfunktion der LDK A+ bis C und die angepassten WUFI®-Funktionen

Die Auswirkung von konvektiven Feuchteinträgen wird anhand der Materialfeuchte der außenseitigen OSB eines Flachdachaufbaus mit unbeschatteter Dachbahn untersucht. Der Diffusionswiderstand der Dampfbremse beträgt konstant 2 m, der restliche Aufbau entspricht jenem in Tab. A-4 im Anhang A.1. Es werden Innenklimata entsprechend den Feuchtelasten aus dem WTA-Merkblatt 6-2-01/D verwendet (Abb. 14). Die Innentemperaturen betragen jeweils ( $21 \pm 1$ ) °C. Tab. 3 zeigt die Variationen, welche bei den Simulationen vorgenommen werden.

Wie Abb. 15 oben zeigt, steigt die Materialfeuchte der außenseitigen OSB mit abnehmender Luftdichtheit deutlich an. Eine Erhöhung des solaren Absorptionskoeffizienten verringert den Einfluss der Luftdichtheit, jedoch steigt dieser wieder deutlich bei einer Erhöhung der Raumluftfeuchte, was Abb. 15 Mitte und Abb. 15 unten verdeutlichen.

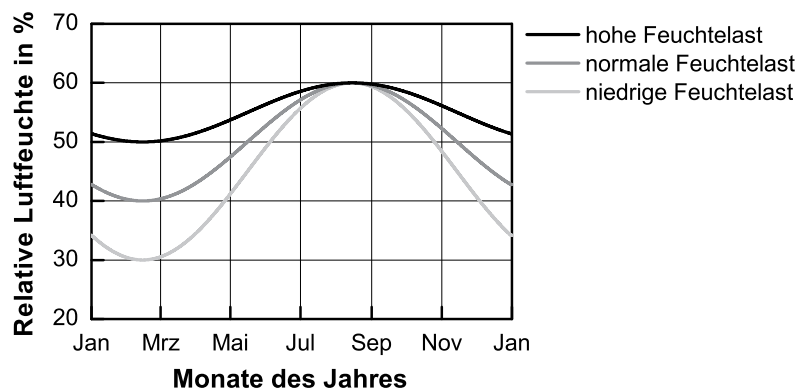


Abb. 14: Relative Luftfeuchten im Innenraum entsprechend den Feuchtelasten aus WTA-Merkblatt 6-2-01/D

Tab. 3: Variationen zur Untersuchung der Auswirkung von konvektiven Feuchteinträgen

Variante	I (Abb. 15 oben)	II (Abb. 15 Mitte)	III (Abb. 15 unten)
Innenklima nach WTA	normale Feuchtelast	normale Feuchtelast	hohe Feuchtelast
solarer Absorptionskoeffizient der Dachbahn	0,65	0,9	0,9

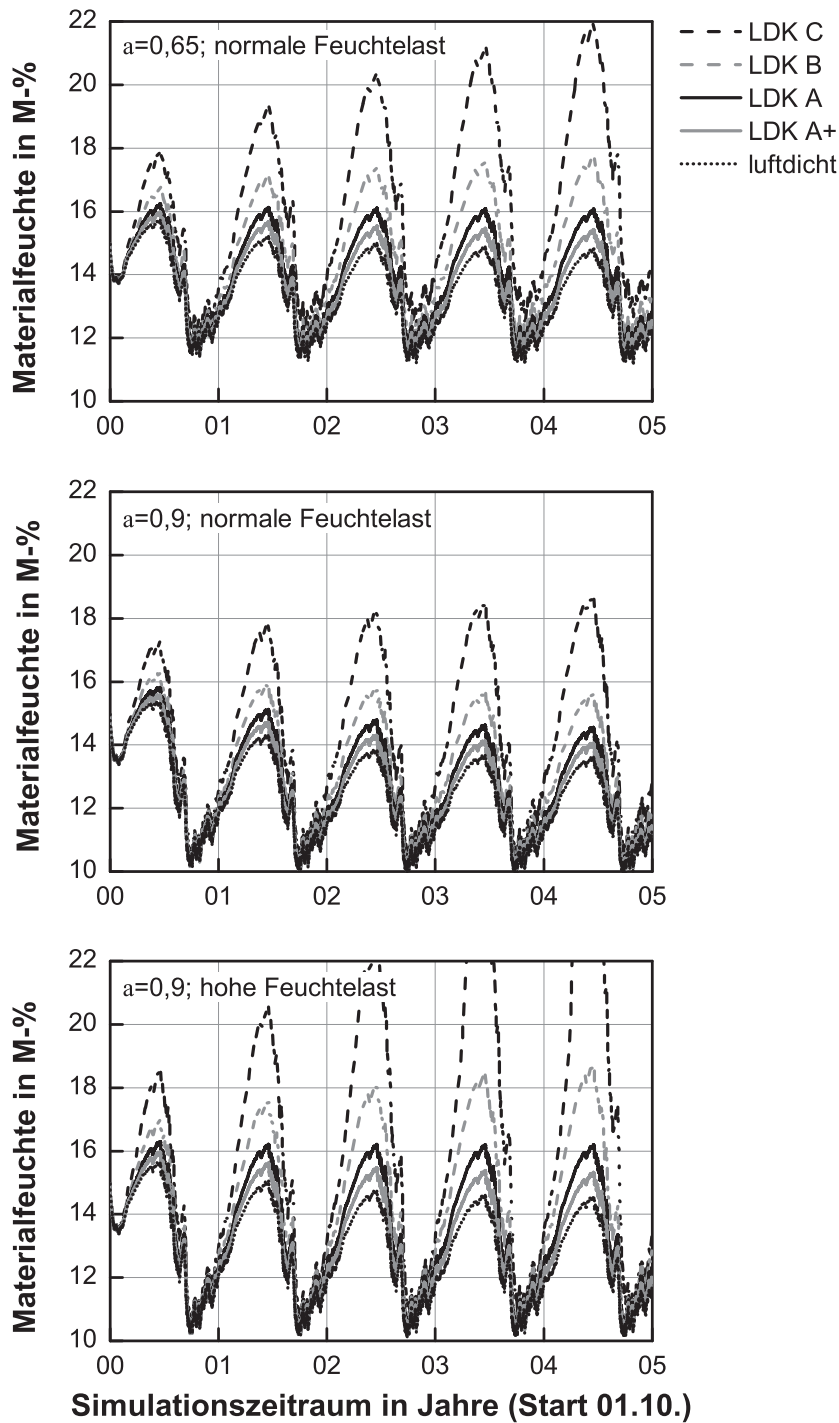


Abb. 15: Einfluss der Luftdichtheitsklasse auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB eines unbeschatteten Flachdachs am Standort Holzkirchen (D)  
 Oben: helle Dachbahn ( $a = 0,65$ ) bei normaler Feuchtelast im Innenraum  
 Mitte: dunkle Dachbahn ( $a = 0,9$ ) bei normaler Feuchtelast im Innenraum  
 Unten: dunkle Dachbahn ( $a = 0,9$ ) bei hoher Feuchtelast im Innenraum



## 4.2 Beschattungssituationen

Die Rücktrocknung von Feuchtigkeit aus dem Gefach eines Flachdaches mit Dachabdichtung startet mit Erhöhung des Wasserdampfpartialdruckes im Gefach über jenen im Innenraum. Hierfür sind erhöhte Temperaturen im Gefach notwendig, wofür i.d.R. die Sonneneinstrahlung auf das Dach benötigt wird.

Nachfolgend wird anhand von Simulationen aufgezeigt, wie sich temporäre Beschattungen auf den Feuchtehaushalt von hölzernen Flachdächern mit Dachabdichtung auswirken.

Anschließend wird ein Ansatz hergeleitet, welcher es ermöglicht, die maximal mögliche Beschattungsdauer für Flachdachkonstruktionen in Holzrahmenbauweise ohne zusätzliche Simulationen der Beschattung zu ermitteln und ihre Tauglichkeit für spezifische Beschattungssituationen zu beurteilen.

Abschließend wird der vorgestellte Ansatz anhand einer Sensitivitätsanalyse überprüft.

### 4.2.1 Auswirkungen temporärer Beschattungen

Eine Beschattung über die Mittagszeit, wodurch die maximale Strahlungsdichte von der Dachfläche abgehalten wird, reduziert den möglichen Umkehrdiffusionsstrom und somit die sommerliche Rücktrocknung am stärksten. Eine bauliche Situation, welche diesen Effekt hervorruft zeigt Abb. 16. Lediglich durch die Änderung des Azimuts  $A$  (Horizontalwinkel) der Sonne kann der betrachtete Punkt besonnt werden. Der Höhenwinkel  $H$  der Sonne ist für Mitteleuropa auch am 21. Juni hierfür zu gering, was dem Sonnenstandsdiagramm für Wien in Abb. 17 entnommen werden kann.

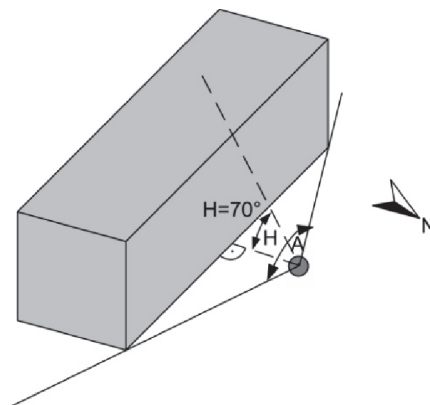


Abb. 16: Schematische Darstellung einer möglichen baulichen Situation in Mitteleuropa durch welche lediglich der veränderliche Azimut  $A$  der Sonne eine direkte Besonnung des betrachteten Punktes ermöglicht

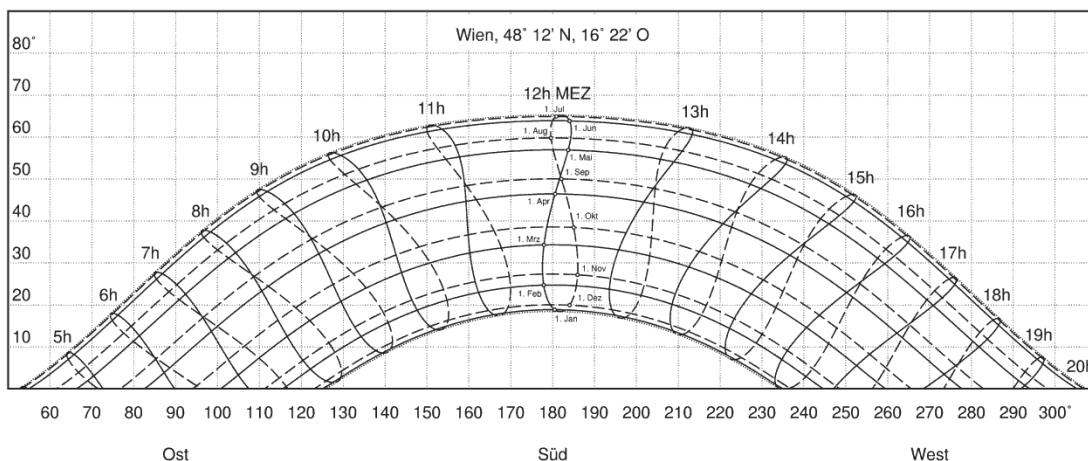


Abb. 17: Sonnenstandsdiagramm für Wien. Die Abszisse zeigt den Azimut A und die Ordinate den Höhenwinkel H der Sonne [SdW]

Die gemäß Finkensteiner et al. (2006) errechneten Azimutwinkel der Sonne am Standort Klagenfurt (46° Nord) sind in Abb. 18 aufgetragen<sup>2</sup>. Es wird anhand dieser Grafik ebenfalls der Zusammenhang zwischen Sonnenazimut und Beschattungsdauer verdeutlicht. Wird der betrachtete Punkt am Dach am 21. Juni zwischen 10 Uhr und 13:30 Uhr (Normalzeit) beschattet, d.h. bei einem Sonnenazimut zwischen 123° und 224°, so beginnt das Beschattungsintervall am 21. Dezember hingegen bereits um etwa 7:30 Uhr und dauert bis etwa 15 Uhr.

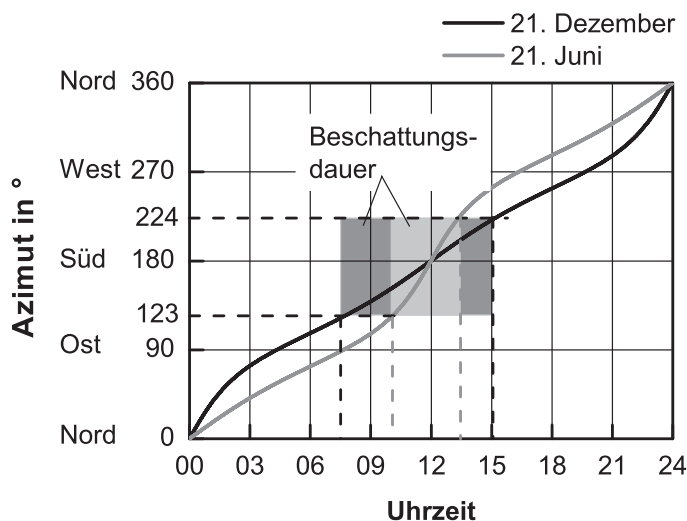


Abb. 18: Tagesverlauf des Azimut an der Winter- und Sommersonnenwende am Standort Klagenfurt (46° Nord) sowie Darstellung möglicher Beschattungsdauern

<sup>2</sup> Die Analemma (gestreckte Achten in Abb. 17) wird bei diesem vereinfachten Ansatz nicht berücksichtigt, d.h. der Azimut beträgt um 12:00 Uhr jeweils 180° und verläuft umgekehrt symmetrisch zum 21. Juni bzw. zum 21. Dezember 12:00 Uhr.

Abb. 19 zeigt beispielhaft die Beschattungsdauer im Jahresverlauf, wenn das Dach am 21. Juni zwischen 11 Uhr und 13 Uhr (Normalzeit) aufgrund der Azimutänderung der Sonne beschattet wird (Lösungsfunktion). Ebenfalls aufgetragen ist die für die Simulation verwendete Stufenfunktion, welche durch Runden auf volle Stundenwerte gewonnen wird.

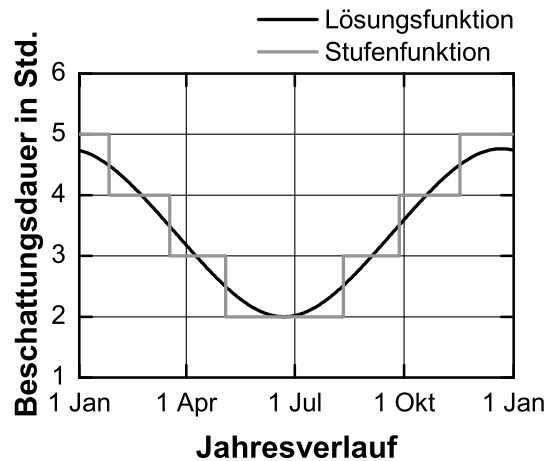


Abb. 19: Beschattungsdauer im Jahresverlauf (Lösungsfunktion) bei einem Beschattungsbeginn am 21. Juni um 11 Uhr (Normalzeit) in Holzkirchen (D) und einer Beschattungsdauer von 2 Stunden, sowie die zur Simulation verwendete Stufenfunktion mit vollen Stundenwerten

Für Situationen ohne benachbarte Objekte ergibt sich die solare Einstrahlung auf den betrachteten Punkt durch Gleichung (4.4). Bei schattenwerfenden Objekten entsprechend Abb. 16, verändert sich die solare Einstrahlung aufgrund der fehlenden Sonneneinstrahlung und des reduzierten Sichtfaktors zum Himmel. Für weitere Berechnungen der Solarstrahlung bei möglichen Beschattungssituationen wird die Diffusstrahlung deshalb generell durch einen Sichtfaktor (SF) von 0,5 reduziert.

Für die Zeit während der Besonnung wird die eintreffende Solarstrahlung durch Gleichung (4.5) und für die Zeit der Beschattung durch Gleichung (4.6) berechnet.

$$I_{\text{bes}} = I_{\text{dir}} + I_{\text{dif}} \quad (4.4)$$

$$I_{\text{besch}} = I_{\text{dir}} + \text{SF} \cdot I_{\text{dif}} \quad \text{während Besonnung} \quad (4.5)$$

$$I_{\text{besch}} = \text{SF} \cdot I_{\text{dif}} \quad \text{während Beschattung} \quad (4.6)$$

- $I_{\text{bes}}$  solare Einstrahlung bei Vollzeit besonnten Situationen  $\text{W/m}^2$
- $I_{\text{besch}}$  solare Einstrahlung bei Beschattungssituationen in  $\text{W/m}^2$
- $I_{\text{dir}}$  Direktstrahlung in  $\text{W/m}^2$
- $I_{\text{dif}}$  Diffusstrahlung in  $\text{W/m}^2$
- SF Sichtfaktor zum Himmel (0,5)

Nachfolgend werden die Auswirkungen einer temporären Beschattung auf den Feuchtehaushalt von Flachdachkonstruktionen untersucht. Simuliert werden Foliendachelemente entsprechend Aufbau 4 in Tab. A-4 im Anhang A.1

Als Standort wird zunächst Holzkirchen gewählt. Der solare Absorptionskoeffizient der Dachbahn wird auf  $a = 0,6$  und die Luftdichtheitsklasse auf B festgelegt. Es wird eine normale Feuchtelast gemäß WTA-Merkblatt 6-2-01/D verwendet.

Abb. 20 links zeigt den Einfluss der Uhrzeit des Beschattungsbeginns, wenn die Beschattungsdauer jeweils 2 Std. beträgt. Wie zu erkennen ist, wirkt sich eine Beschattung symmetrisch um 12 Uhr am negativsten auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB aus. Es wird auch deutlich, dass eine Beschattung am Nachmittag zu etwas höheren Materialfeuchten führt als eine Beschattung am Vormittag.

Die rechte Grafik in Abb. 20 verdeutlicht die Auswirkung der Beschattungsdauer auf den Materialfeuchtegehalt der außenseitigen OSB. Bei einer Beschattungsdauer von 4 Std. symmetrisch um 12 Uhr (Normalzeit) wird die zulässige Materialfeuchte von 18 M-% überschritten.

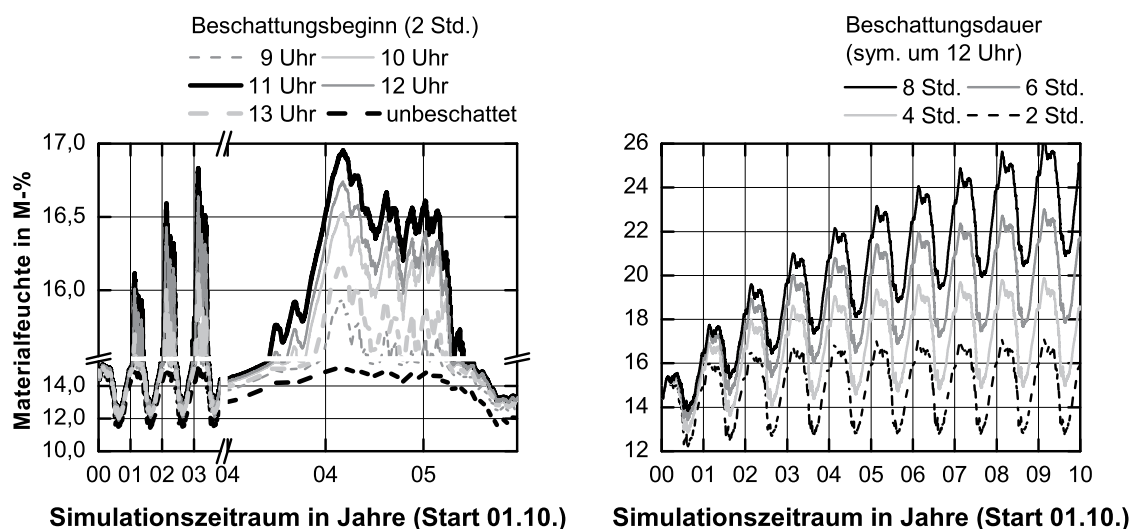


Abb. 20: Links: Einfluss des Beschattungsbeginns (Normalzeit) am 21. Juni bei einer Beschattungsdauer von 2 Std, Standort Holzkirchen (D), solarer Absorptionskoeffizient  $a = 0,6$ , normale Feuchtelast, LDK B  
 Rechts: Auswirkung unterschiedlicher Beschattungsdauern wenn diese symmetrisch um 12 Uhr (Normalzeit) erfolgen, Standort Holzkirchen (D), solarer Absorptionskoeffizient  $a = 0,6$ , normale Feuchtelast, LDK B

Wie sich der solare Absorptionkoeffizient auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB auswirkt zeigt Abb. 21 links. Die Randbedingungen entsprechen jenen der vorherigen Simulationen, jedoch wird eine Beschattungsdauer von 4 Stunden (symmetrisch um 12 Uhr) angenommen. Es ist zu erkennen, dass erst ab einem solaren Absorptionskoeffizienten  $> 0,7$  die kritische Materialfeuchte von 18 M-% nicht mehr überschritten wird.

Anhand von Abb. 21 rechts wird der Einfluss des Standortes sichtbar. Während die Dachkonstruktion mit einem solaren Absorptionsgrad von 0,9 bei einer Beschattungsdauer von 4 Stunden in Klagenfurt und Holzkirchen (D) keine schädliche Materialfeuchte an der außenseitigen OSB aufweist, steigt diese am kalten Standort Helsinki (FIN) auf kritische Werte an.

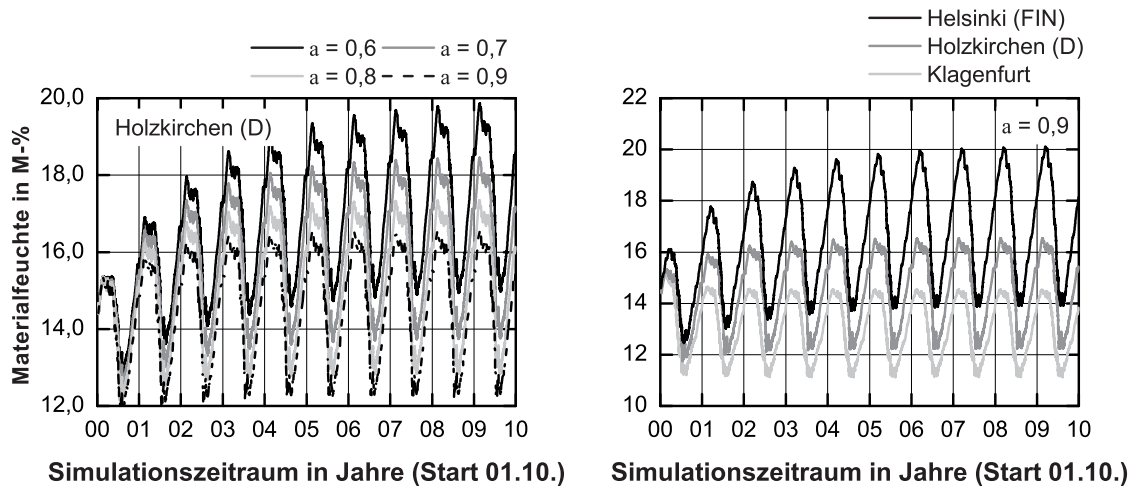


Abb. 21: Links: Einfluss des solaren Absorptionskoeffizienten auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB bei einem Beschattungsbeginn am 21. Juni um 10 Uhr (Normalzeit) und einer Beschattungsdauer von 4 Stunden, Standort Holzkirchen (D), normale Feuchtelast, LDK B  
 Rechts: Auswirkung unterschiedlicher Standorte, normale Feuchtelast, LDK B, solarer Absorptionskoeffizient  $a = 0,9$

Wie sich verschiedene Beschattungssituationen in Kombination mit unterschiedlichen konvektiven Feuchteinträgen auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB auswirken, wird durch Abb. 22 ersichtlich. Die beiden Grafiken zeigen die Auswirkung unterschiedlicher Beschattungsdauern am 21. Juni (symmetrisch um 12 Uhr Normalzeit) und unterschiedlicher konvektiver Feuchteinträge ( $Q_{50}$ -Wert in WUFI®) auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB. Aufgetragen ist der Quotient aus der maximalen Materialfeuchte der außenseitigen OSB im 10. Simulationsjahr ( $u_{max}$ ) und der Materialfeuchtegrenze von 18 M-%. Wird der Wert 1 überschritten, so übersteigt die Materialfeuchte der außenseitigen OSB 18 M-%.

Die obere Grafik in Abb. 22 zeigt das Verhalten eines Dachelements mit einem solaren Absorptionskoeffizienten von 0,9. Die untere Grafik zeigt das Verhalten des Dachelements mit einem solaren Absorptionskoeffizienten von 0,6. Als Standort wird Holzkirchen festgelegt.

Wie zu erkennen ist, wird die Auswirkung der beiden Parameter  $t_{besch}$  und  $Q_{50}$  auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB stark von der Ausprägung des jeweils anderen Parameters bestimmt. Mit Zunahme beider Parameter zeigt sich anfangs eine progressive Auswirkung auf die Materialfeuchte. Bei der Variante mit  $a = 0,6$  reduziert sich der Ein-

fluss auf die Materialfeuchte von  $t_{\text{besch}}$  und  $Q_{50}$  bei sehr hohen Werten dieser beiden Parameter wieder. Es ist auch zu erkennen, dass der Einfluss von  $t_{\text{besch}}$  und  $Q_{50}$  mit abnehmendem solaren Absorptionskoeffizienten zunimmt.

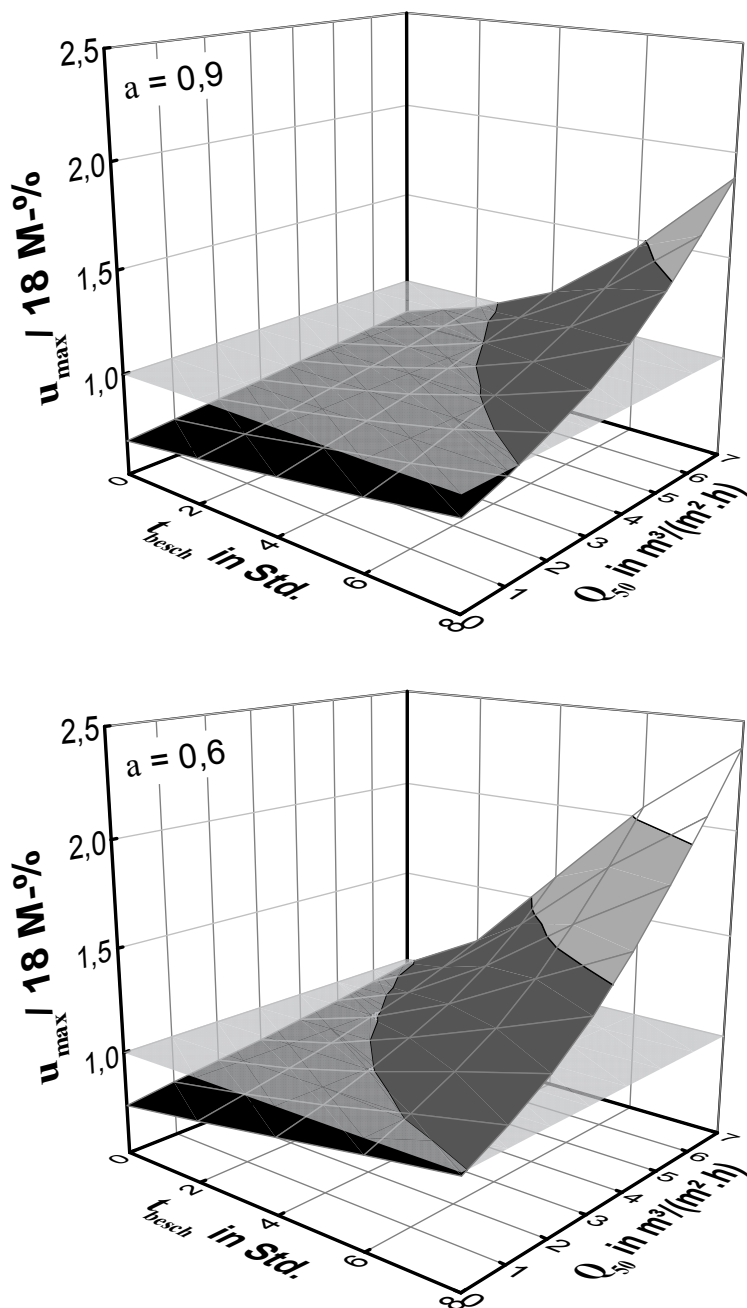


Abb. 22: Einfluss der Beschattungsdauer  $t_{\text{besch}}$  (symmetrisch um 12 Uhr Normalzeit am 21. Juni) und des konvektiven Feuchteintrags ( $Q_{50}$ -Wert in WUFI®) auf den Quotienten aus der maximalen Materialfeuchte der außenseitigen OSB im 10. Simulationsjahr ( $u_{\text{max}}$ ) und der Materialfeuchtegrenze von 18 M-%. Standort Holzkirchen (D), normale Feuchtelast, Raumhöhe 8 m  
 Oben: solarer Absorptionskoeffizient der Dachbahn  $a = 0,9$   
 Unten: solarer Absorptionskoeffizient der Dachbahn  $a = 0,6$

Zur Abschätzung des Einflusses der Stufenfunktion mit Stundenzeitschritten anstelle der Lösungsfunktion auf die Ergebnisse der Beschattungssimulation, wird die eben diskutierte Variante mit  $a = 0,6$  weiter betrachtet.

Abb. 23 links zeigt nochmals die Lösungsfunktion und die Stufenfunktion bei 60 Minuten Zeitschrittweiten, zusätzlich aufgetragen ist eine weitere Stufenfunktion mit einer Zeitschrittweite von 15 Minuten. Die Lösungsfunktion wird hiermit deutlich exakter beschrieben.

Die rechte Grafik in Abb. 23 zeigt den Vergleich der maximalen Materialfeuchte bei Variation der Zeitschrittweite, der Beschattungsdauer und des konvektiven Feuchteintrags. Dargestellt ist der Quotienten der maximalen Materialfeuchte der außenseitigen OSB bei 15 Minuten und 60 Minuten Zeitschritten im 10. Simulationsjahr. Wird der Wert 1 unterschritten, so werden durch 15 Minuten Zeitschritte geringere Materialfeuchten erreicht.

Wie zu erkennen ist, liegt die maximale Materialfeuchte bei 15 Minuten Zeitschritten immer unterhalb jener durch 60 Minuten Zeitschritte. Es ist eine tendenzielle Zunahme der Unterschreitung mit zunehmender Feuchtebelastung auf das Dach zu beobachten. Die Unterschiede sind mit einer maximalen relativen Unterschreitung von 2,3 % jedoch gering. Durch die Verwendung der Lösungsfunktion anstelle der Stufenfunktion mit 15 Minuten Zeitschrittweite sind nur geringfügig andere Ergebnisse zu erwarten.

Aufgrund der schwach ausgeprägten Differenzen zwischen den Ergebnissen bei Verwendung der Stufenfunktionen mit 60 Minuten und 15 Minuten Zeitschrittweite und der deutlich gesteigerten Simulationsdauer und Datenmenge bei Verwendung von geringen Zeitschrittweiten, werden bei den nachfolgenden Simulationen jeweils Stufenfunktionen mit 60 Minuten Zeitschrittweite verwendet.

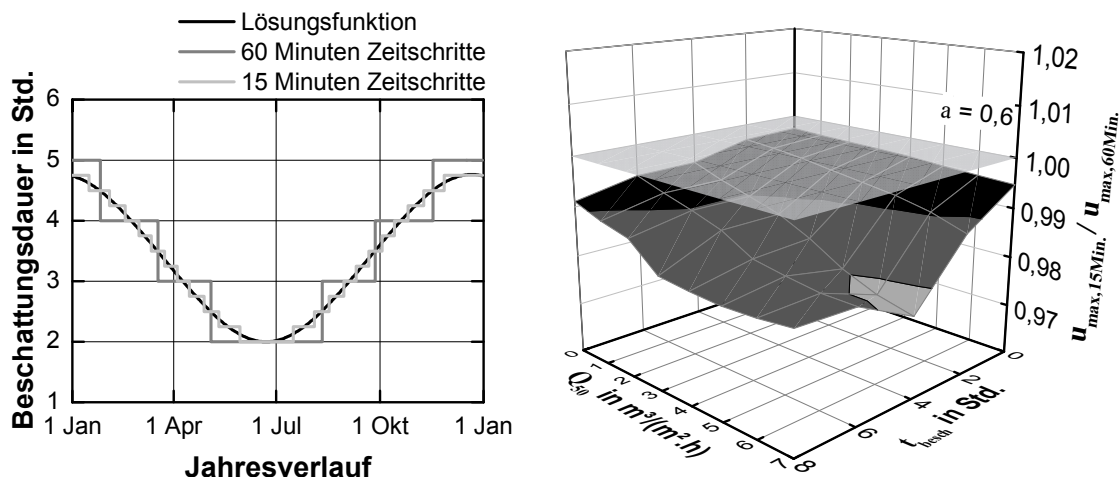


Abb. 23: Links: Beschattungsdauer im Jahresverlauf (Lösungsfunktion) bei einem Beschattungsbeginn am 21. Juni um 11 Uhr (Normalzeit) in Holzkirchen (D) und einer Beschattungsdauer von 2 Stunden, sowie die zur Simulationen verwendete Stufenfunktionen mit 60 Minuten und 15 Minuten Zeitschrittweiten  
 Rechts: Quotient der maximalen Materialfeuchte der außenseitigen OSB im 10. Simulationsjahr bei Simulation mit Stufenfunktionen mit 15 Minuten ( $u_{\max,15\text{Min.}}$ ) und 60 Minuten ( $u_{\max,60\text{Min.}}$ ) Zeitschrittweiten unter Variation der Beschattungsdauer  $t_{\text{besch}}$  (symmetrisch um 12 Uhr Normalzeit am 21. Juni) und des konvektiven Feuchteintrags ( $Q_{50}$ -Wert in WUFI®)

#### 4.2.2 Ansatz zur Ermittlung der maximal möglichen Beschattungsdauer

Der nachfolgend präsentierte Ansatz zur Ermittlung der maximal möglichen Beschattungsdauer verfolgt die Idee, dass ein temporär beschattetes Dach mit hohem solaren Absorptionskoeffizienten (dunkle Dachabdichtung) eine vergleichbare sommerliche Rücktrocknung aufweist, wie ein unbeschattetes Dach mit niederem Absorptionskoeffizienten (helle Dachabdichtung).

Für die weitere Betrachtung wird davon ausgegangen, dass der größte Teil der sommerlichen Rücktrocknung zwischen Anfang April und Ende September erfolgt, was auch die getätigten Messungen zeigen.

Vereinfachend wird vorausgesetzt, dass die Rücktrocknung lediglich auf diffusive Weise erfolgt. Ein konvektiver Abtransport von Feuchtigkeit aus dem Gefach wird nicht berücksichtigt.

Gleichung (4.7) zeigt die Zusammenhänge der Wasserdampfdiffusionsstromdichte während der sommerlichen Umkehrdiffusion.

$$g = -\delta \cdot \frac{dp_v}{dx} = \frac{\delta_a}{\mu} \cdot \frac{p_v - p_{v,i}}{d} \quad (4.7)$$

- $g$  Diffusionstromdichte in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- $p_v$  Wasserdampfpartialdruck im Gefach in Pa
- $p_{v,i}$  Wasserdampfpartialdruck im Innenraum in Pa
- $d$  Durchströmte Dicke in m
- $\delta$  Diffusionsleitfähigkeit des Bauteils in  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
- $\delta_a$  Diffusionsleitfähigkeit der ruhenden Luft in  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
- $\mu$  Diffusionswiderstandszahl

Damit das „helle“ unbeschattete und das „dunkle“ beschattete Dach die selbe Rücktrocknung aufweisen, müssen ihre Umkehrdiffusionsstromdichten einander entsprechen.

$$\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} g_{\text{hell}} = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} g_{\text{dunkel}} \quad (4.8)$$

- $g_{\text{hell}}$  Umkehrdiffusionstromdichte des hellen unbeschatteten Daches in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- $g_{\text{dunkel}}$  Umkehrdiffusionstromdichte des dunklen beschatteten Daches in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- $t_{\text{start}}$  Startzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung (1. April)
- $t_{\text{end}}$  Endzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung (30. September)

Zur Reduktion der Einflussfaktoren wird lediglich der Partialdruck im Gefach der beiden Dächer als divergierend angesetzt. Die Diffusionsleitfähigkeit der Luft sowie die Diffusionswiderstandszahl des Bauteils werden für beide Dächer als ident angenommen. Nachfolgend wird anstelle des Integrals die kumulative Summe genutzt und stundenweise vorliegende Klimadaten verwendet.

$$t_{\text{rueck}} = \{t_{\text{start}}, t_{\text{start}} + 1, \dots, t_{\text{end}} - 1, t_{\text{end}}\} \quad (4.9)$$

$$\sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{hell},i} = \sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{dunkel},i} \quad (4.10)$$

- $t_{\text{rueck}}$  Rücktrocknungszeitraum in Stundenintervallen
- $t_{\text{start}}$  Startzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung (1. April)
- $t_{\text{end}}$  Endzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung (30. September)
- $p_{v,\text{hell}/\text{dunkel}}$  Wasserdampfpartialdruck im Gefach mit heller/dunkler Dachbahn in Pa

Eine weitere Vereinfachung erfolgt durch die Annahme von gleichwertigen relativen Luftfeuchten in beiden Gefachen. Gleichung (4.10) kann somit durch theoretische Sättigungsdampfdrücke beschrieben werden.

$$\sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat,hell},i} = \sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat,dunkel},i} \quad (4.11)$$

$p_{v,\text{Sat,hell/dunkel}}$  theoretischer Sättigungsdampfdruck im Gefach mit heller/dunkler Dachbahn in Pa

$t_{\text{rueck}}$  Rücktrocknungszeitraum in Stundenintervallen

Die Sättigungsdampfdrücke können gemäß ÖNORM EN ISO 13788 durch Gleichung (4.12) bzw. (4.13) errechnet werden.

$$p_{v,\text{Sat}} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \quad \text{für } \theta \geq 0 \text{ °C} \quad (4.12)$$

$$p_{v,\text{Sat}} = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} \quad \text{für } \theta < 0 \text{ °C} \quad (4.13)$$

$p_{v,\text{Sat}}$  Sättigungsdampfdruck in Pa

$\theta$  Lufttemperatur in °C

Zur Ermittlung der verwendeten Sättigungsdampfdrücke wird die Strahlungslufttemperatur an den Dachelementen verwendet (aus Zürcher und Frank (2010)).

$$\theta^* = \theta + \frac{a \cdot I}{h_e} - \frac{\varepsilon \cdot \Delta\text{IR}}{h_e} \quad (4.14)$$

$\theta^*$  Strahlungslufttemperatur in °C

$\theta$  Lufttemperatur außen in °C

$a$  solarer Absorptionskoeffizient

$I$  solare Einstrahlung in  $\text{W/m}^2$

$h_e$  Wärmeübergangskoeffizient außen in  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$\varepsilon$  Emissionsvermögen der Baustoffoberfläche

$\Delta\text{IR}$  Infrarot Zusatzverluste an den klaren Himmel in  $\text{W/m}^2$

Richtwerte: - bei horizontaler Ausrichtung (50 bis 100)  $\text{W/m}^2$

- bei vertikaler Ausrichtung (10 bis 60)  $\text{W/m}^2$

(untere Werte: warme, feuchte Luft; obere Werte: kalte, trockene Luft)

Abb. 24 zeigt den Vergleich der Strahlungslufttemperatur mit der Dachoberflächentemperatur gemäß WUFI<sup>®</sup>-Simulation eines dunklen Foliendaches ( $a = 0,9$ ) entsprechend Tab. A-4 im Anhang A.1 in Klagenfurt und die somit möglichen Sättigungsdampfdrücke. Eine langwellige Wärmeabstrahlung wird hierbei nicht berücksichtigt. Wie zu erkennen ist, zeigt sich nur ein geringer Unterschied in den Temperaturen. Aufgrund der geringen thermischen Trägheit und des hohen Wärmedurchgangswiderstandes der untersuchten Leichtbaukonstruktionen kann die Dachoberflächentemperatur gut mit der Strahlungslufttemperatur abgeschätzt werden. Die geringe Abweichung bei den Temperaturen resultiert naturgemäß in etwas größeren Differenzen der möglichen Sättigungsdampfdrücke, welche nachfolgend jedoch vernachlässigt werden.

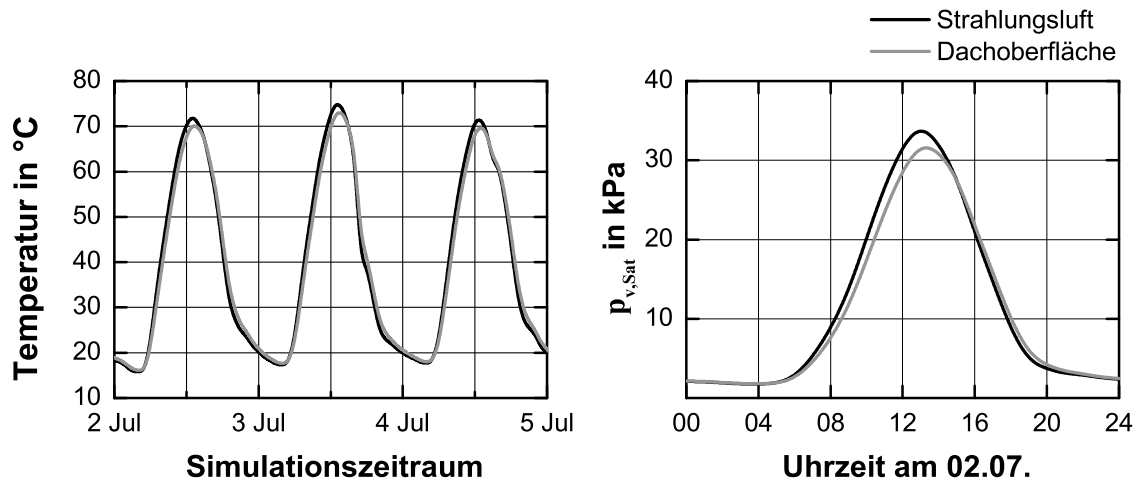


Abb. 24: Links: Strahlungslufttemperatur und Dachoberflächentemperatur eines dunklen Flachdaches ( $a = 0,9$ ) in Holzleichtbauweise  
 Rechts: Aus der Strahlungslufttemperatur und Dachoberflächentemperatur resultierende Sättigungsdampfdrücke

Unter der Voraussetzung, dass die Emissivität der Dachabdichtungen der hellen und dunklen Dachelemente, ihre Wärmestrahlungsverluste und ihr außenseitiger Wärmeübergangswiderstand übereinstimmen, hängt Gleichung (4.11) lediglich von dem solaren Absorptionskoeffizienten der Dachbahn sowie der solaren Einstrahlung ab. Weist das helle Dach ( $a_{\downarrow}$ ) keine Beschattung auf, so kann Gleichung (4.11) lediglich durch eine verringerte solare Einstrahlung auf das dunkle Dach ( $a_{\uparrow}$ ) wahr werden.

Eine spezifische Beschattung des dunklen Daches erfüllt diese Forderung, wodurch man zu Gleichung (4.15) gelangt.

$$\sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat}}(\theta_{\text{min},i}^*) = \sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat}}(\theta_i^*) \quad (4.15)$$

- $p_{v,\text{Sat}}$  theoretischer Sättigungsdampfdruck im Gefach in Pa
- $t_{\text{rueck}}$  Rücktrocknungszeitraum in Stundenintervallen
- $\theta_{\text{min}}^*$  minimal notwendige Strahlungslufttemperatur ohne Beschattung in °C
- $\theta^*$  Strahlungslufttemperatur mit Beschattung in °C

Durch Gleichsetzen der beiden Strahlungslufttemperaturen werden die maßgebenden Einflüsse ersichtlich.

$$a_{\text{min}} \cdot I_{\text{bes}} = a \cdot I_{\text{besch}} \quad (4.16)$$

- $a_{\text{min}}$  minimal notwendiger solarer Absorptionskoeffizient (hell)
- $a$  vorhandener solarer Absorptionskoeffizient (dunkel)
- $I_{\text{bes}}$  solare Einstrahlung bei Vollzeit besonnten Situationen  $\text{W/m}^2$
- $I_{\text{besch}}$  solare Einstrahlung bei Beschattungssituationen in  $\text{W/m}^2$

Mit Hilfe instationärer Simulationen kann der minimal notwendige solare Absorptionskoeffizient  $a_{\min}$  so bestimmt werden, dass das zu überprüfende Dachelement bei Vollzeit besonnen Randbedingungen ein zu definierendes Tauglichkeitskriterium (Abschnitt 4.2.4) nicht verletzt.

Durch Variation der Beschattungsdauer und demensprechender Adaption der solaren Einstrahlung  $I_{\text{besch}}$  (Gleichung (4.5) und (4.6)) in der Strahlungslufttemperatur  $\theta^*$  (Gleichung (4.14)) kann durch Gleichung (4.17) abschließend die maximal mögliche Beschattungsdauer bestimmt werden.

$$0 = \sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat}}(\theta_{\min,i}^*) - \sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat}}(\theta_i^*) \quad (4.17)$$

- $p_{v,\text{Sat}}$  theoretischer Sättigungsdampfdruck im Gefach in Pa
- $t_{\text{rueck}}$  Rücktrocknungszeitraum in Stundenintervallen
- $\theta_{\min}^*$  minimal notwendige Strahlungslufttemperatur ohne Beschattung in °C
- $\theta^*$  Strahlungslufttemperatur mit Beschattung in °C

Abb. 25 zeigt beispielhaft den sich so ergebenden Jahresverlauf der maximal möglichen Beschattungsdauer bei einem Beginn der Beschattung am 21. Juni um 10 Uhr (Normalzeit) in Klagenfurt für die solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{\min} = 0,6$  und  $a = 0,9$ .

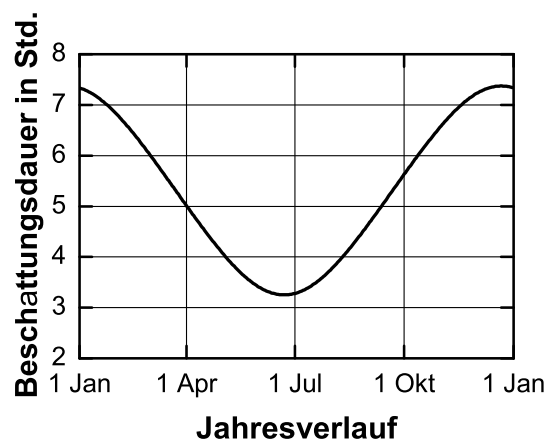


Abb. 25: Maximal mögliche Beschattungsdauer bei einem Beschattungsbeginn am 21. Juni um 10 Uhr (Normalzeit) in Klagenfurt für die solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{\min} = 0,6$  und  $a = 0,9$

Um eine Aussage zu der maximal möglichen Beschattungsdauer für verschiedene Beschattungsstartzeitpunkte machen zu können, wird ein Diagramm entsprechend Abb. 26 vorgeschlagen. Die Grafik zeigt beispielhaft die maximal mögliche Beschattungsdauer in Abhängigkeit des Beschattungsbeginns (Normalzeit) für die solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{\min} = 0,6$  und  $a = 0,9$  in Klagenfurt (vgl. Abb. 25).

Abb. 27 zeigt ebenfalls die maximal möglichen Beschattungsdauern, jedoch für die solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{\min} = 0,8$  und  $a = 0,9$ .

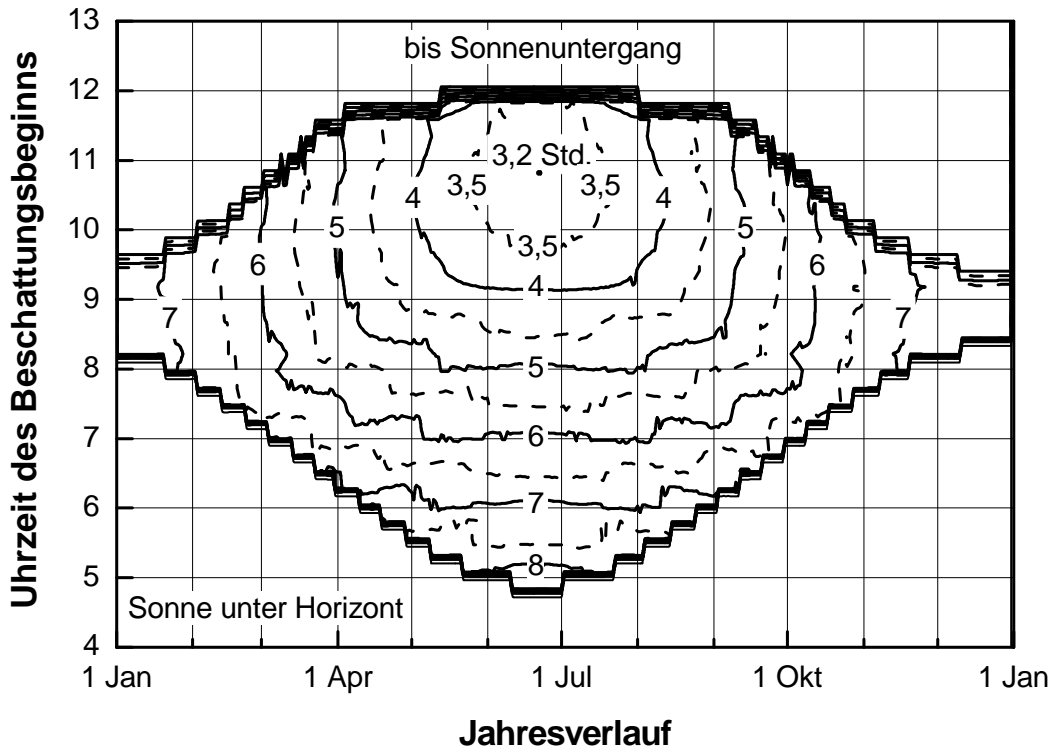


Abb. 26: Maximal mögliche Beschattungsdauer in Abhängigkeit des Beschattungsbeginns (Normalzeit, MEZ) in Klagenfurt für die solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{min} = 0,6$  und  $a = 0,9$

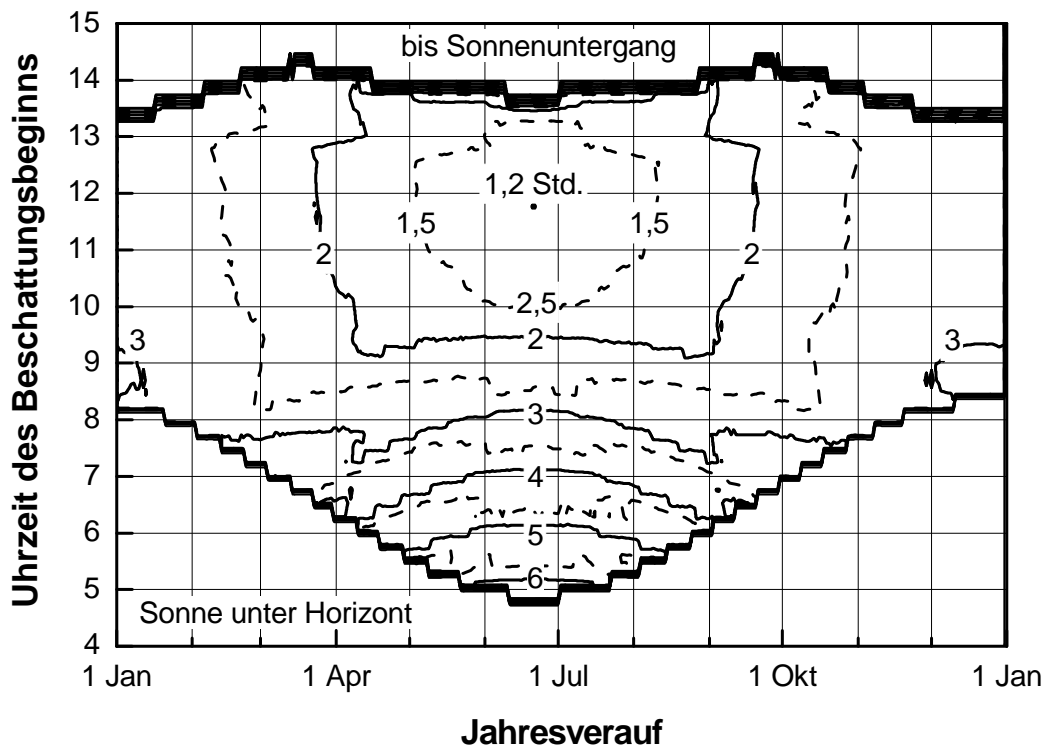


Abb. 27: Maximal mögliche Beschattungsdauer in Abhängigkeit des Beschattungsbeginns (Normalzeit, MEZ) in Klagenfurt für die solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{min} = 0,8$  und  $a = 0,9$

### 4.2.3 Sensitivitätsanalyse

Anhand der nachfolgenden Sensitivitätsanalyse wird überprüft, in wie weit die Annahme zutrifft, dass ein gemäß Gleichung (4.17) spezifisch beschattetes Dach mit dunkler Dachabdichtung ( $a_{\uparrow}$ ) eine vergleichbare Rücktrocknung wie ein unbeschattetes helles Dach ( $a_{\min,\downarrow}$ ) aufweist und wie sich verschiedene Einflussfaktoren auf die Ergebnisse des gewählten Ansatzes auswirken.

Hierfür wird anhand von numerischen Simulationen mit WUFI® die Wirkung der errechneten Beschattungsdauern auf Flachdächer entsprechend dem Aufbau in Tab. A-4 im Anhang A.1. untersucht. Soweit nicht anders angegeben wird als Standort Klagenfurt und als Innenklima jenes gemäß der normalen Feuchtelast aus WTA-Merkblatt 6-2-01/D verwendet. Es wird, falls nicht anders angegeben, ein konvektiver Feuchteintrag entsprechend der Luftdichtheitsklasse B angesetzt.

Als Beurteilungskriterium wird der Quotient aus den Materialfeuchten der außenseitigen OSB der beiden Dächer mit  $a$  und  $a_{\min}$  herangezogen. Die OSB-Materialfeuchte des Daches mit  $a_{\min}$  dient als Referenzfeuchte.

$$Y = \frac{u}{u_R} \quad (4.18)$$

Y	Materialfeuchtequotient
u	Materialfeuchte der außenseitigen OSB des beschatteten Daches in M-%
$u_R$	Materialfeuchte der außenseitigen OSB des unbeschatteten Daches in M-% (Referenzmaterialfeuchte)

Nachfolgend werden die Einflüsse folgender Parameter untersucht:

- I. Solarer Absorptionskoeffizient
- II. Uhrzeit der Beschattungsbeginns
- III. Feuchtelast
- IV. Dampfbremse
- V. Standort

#### 4.2.3.1 Einfluss der solaren Absorptionskoeffizienten

Um den Einfluss der solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{\min}$  und  $a$  auf den Quotienten  $Y$  zu untersuchen, werden Berechnungen mit der ermittelten maximalen Beschattungsdauer bei einem Beschattungsbeginn am 21. Juni um 10 Uhr (Normalzeit) durchgeführt.

Tab. 4 zeigt die Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten, welche im Zuge der Sensitivitätsanalyse untersucht werden.

Tab. 4: Untersuchte Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{\min}$  und  $a$

Variante	I	II	III	IV	V	VI
$a_{\min}$	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,8
$a$	0,6	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9

Abb. 28 links zeigt den Verlauf des Quotienten  $\gamma$  während des gesamten simulierten Zeitraums für verschiedene Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten. Abb. 28 rechts zeigt die zugehörigen Referenzmaterialfeuchten. Die Verläufe des eingeschwungenen, letzten Simulationsjahrs sind jeweils detaillierter dargestellt. Wie zu erkennen ist, übersteigt die Materialfeuchte des Daches mit Beschattung die Referenzmaterialfeuchte zumeist etwas. Die maximale Überschreitung der Referenzfeuchte erfolgt im 1. Quartal und beträgt 6,3 % bei der Kombination  $a_{\min} = 0,6$  und  $a = 0,9$  mit  $u_R = 13,9$  M-%.

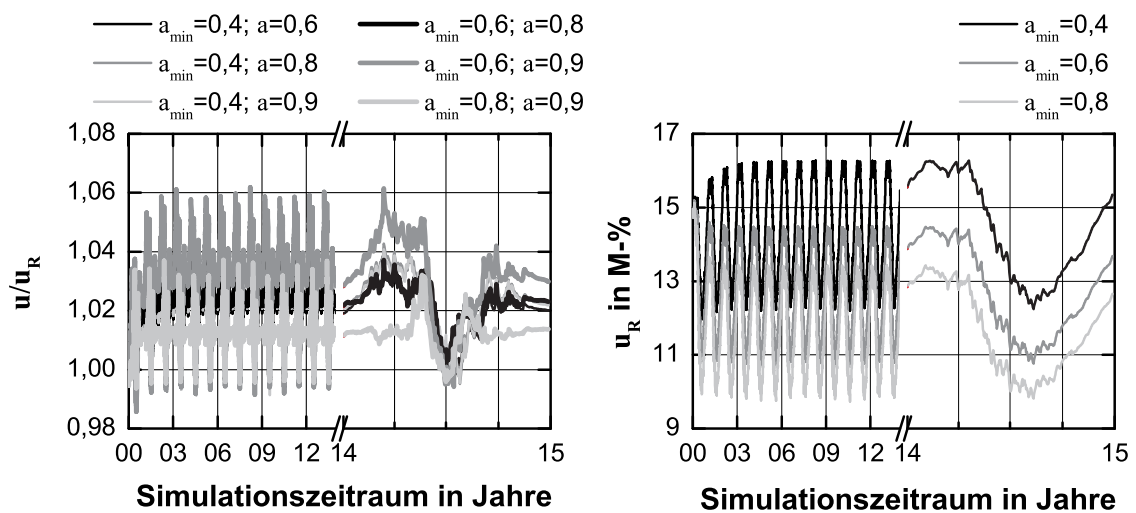


Abb. 28: Links: Materialfeuchtequotient während des gesamten Simulationszeitraums für verschiedene Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{\min}$  und  $a$   
 Rechts: Referenzmaterialfeuchte des unbeschatteten Daches während des gesamten Simulationszeitraums für verschiedene minimale solare Absorptionskoeffizienten  $a_{\min}$

Anhand von Abb. 29 wird die Abhängigkeit des Materialfeuchtequotienten von der Referenzmaterialfeuchte ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass der maximale Materialfeuchtequotient zumeist im Bereich der maximalen Referenzfeuchte liegt, jedoch nicht mit ihr zusammenfällt. Im ersten Halbjahr ist im Allgemeinen eine Korrelation zwischen der Referenzfeuchte und dem Materialfeuchtequotienten zu erkennen. Im zweiten Halbjahr zeigt sich dieser Zusammenhang kaum.

Ein allgemein gültiger Zusammenhang zwischen den solaren Absorptionskoeffizienten und dem Quotienten  $\gamma$  ist nicht zu erkennen.

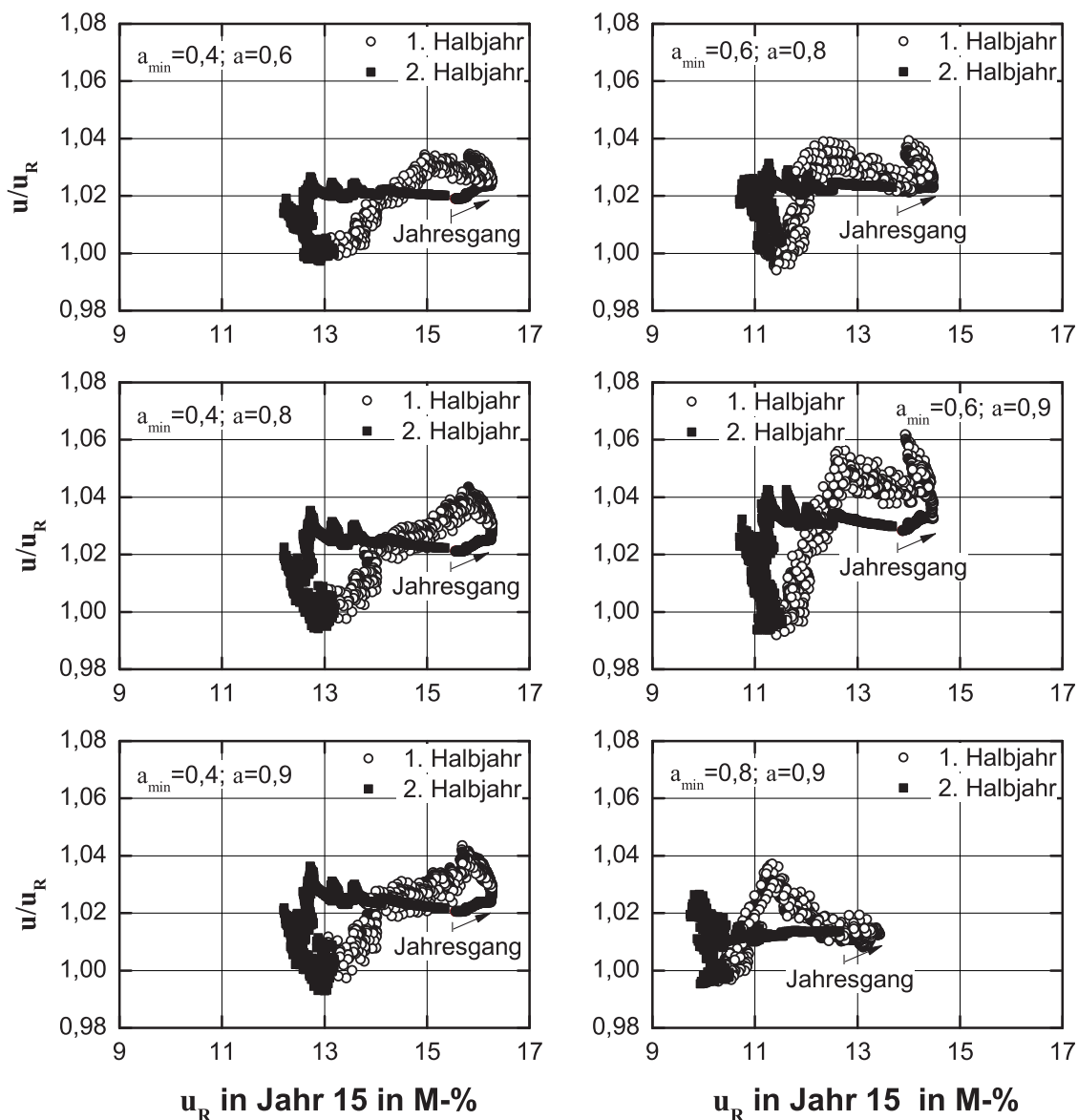


Abb. 29: Materialfeuchtequotienten in Abhängigkeit von der Referenzfeuchte  $u_R$  im letzten Simulationsjahr bei verschiedenen Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{min}$  und  $a$

#### 4.2.3.2 Einfluss des Beschattungsbeginns

Um den Einfluss des Beschattungsbeginns auf den Materialfeuchtequotienten zu untersuchen, werden Berechnungen mit den solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{min} = 0,6$  und  $a = 0,9$  durchgeführt. Diese Kombination weist gemäß Abb. 29 den höchsten Materialfeuchtequotienten  $\gamma$  auf. Zur Kontrolle wird zusätzlich die Kombination  $a_{min} = 0,8$  und  $a = 0,9$  untersucht.

Tab. 5 zeigt die verschiedenen untersuchten Startzeitpunkte der Beschattung am 21. Juni.

Tab. 5: Untersuchte Startzeitpunkte der Beschattung am 21. Juni (Normalzeit)

Variante	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Beschattungsbeginn (Uhrzeit)	5	7	9	11	12	13	15	17	19

Abb. 30 zeigt die Verläufe der maximal möglichen Beschattungsdauern bei Variation des Beschattungsbeginns am 21. Juni für die beiden Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten. Die gestrichelten Linien verdeutlichen, dass die Beschattung für den Rest des Tages erfolgen kann.

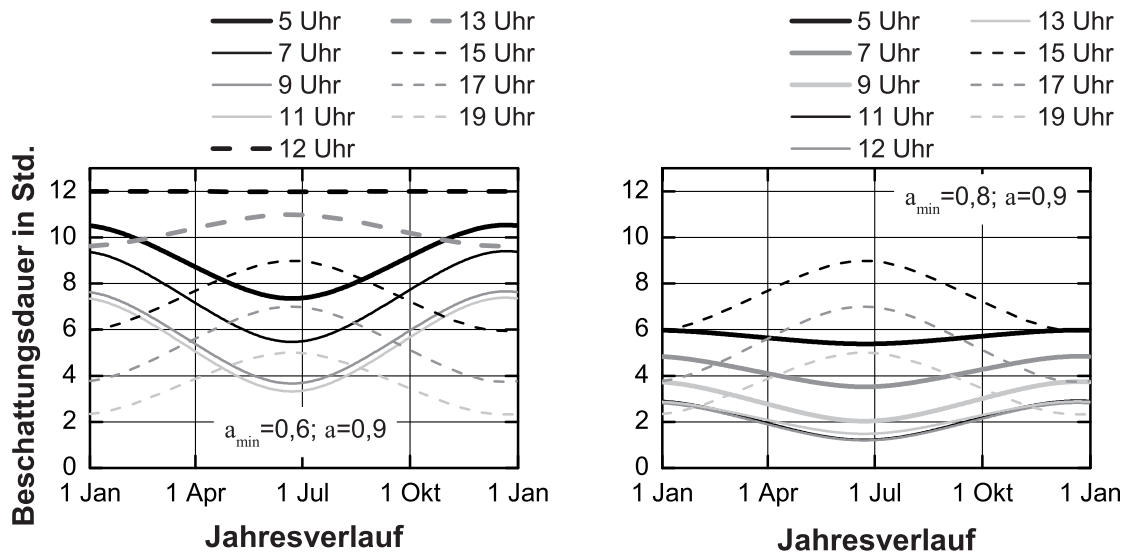


Abb. 30: Maximal mögliche Beschattungsdauer im Jahresverlauf in Abhängigkeit des Startzeitpunktes der Beschattung am 21. Juni (Normalzeit) für zwei Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{\min}$  und  $a$

In Abb. 31 sind die maximalen Materialfeuchtequotienten ( $\gamma_{\max}$ ) in Abhängigkeit des Beschattungsbeginns für die untersuchten Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass  $\gamma_{\max}$  für Beschattungen ab der Mittagszeit abnimmt. Bei einem Beschattungsbeginn vor 12 Uhr zeigt sich hingegen keine eindeutige Abhängigkeit zwischen dem maximalen Materialfeuchtequotienten und der Uhrzeit des Beschattungsbeginns. Der maximale Materialfeuchtequotient wird jeweils bei einem Beschattungsbeginn um 11 Uhr erreicht.

Ermöglicht die errechnete Beschattungsdauer eine Beschattung für den Rest des Tages (vgl. Abb. 30), so erzeugen beide Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten maximale Materialfeuchtequotienten von  $< 1$ .

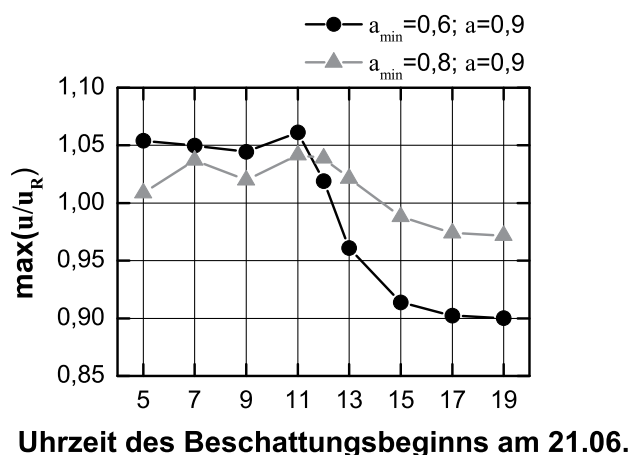


Abb. 31: Maximaler Materialfeuchtequotient in Abhängigkeit des Beschattungsbeginns (Normalzeit) am 21. Juni für zwei Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten  $a_{\min}$  und  $a$

#### 4.2.3.3 Einfluss der Feuchtelast

Um den Einfluss der Feuchtelast auf den Materialfeuchtequotienten  $\gamma$  zu untersuchen, werden die Raumlufffeuchte und der konvektive Feuchteeintrag variiert. Die solaren Absorptionskoeffizienten werden auf  $a_{\min} = 0,6$  und  $a = 0,9$  festgelegt. Es wird ein Beschattungsbeginn am 21. Juni um 11 Uhr (Normalzeit) angenommen. Bei dieser Kombination ergibt sich gemäß Abb. 31 der höchste Materialfeuchtequotient.

Die Feuchtelaststufen werden folgendermaßen definiert, wobei die sommerliche Raumlufffeuchte jeweils 60 % beträgt:

- 30/60 LDK A+ (8m): Raumlufffeuchte im Winter 30 %, Luftdichtheitsklasse (LDK) A+, Höhe der zusammenhängenden Luftsäule 8 m
- 40/60 LDK A (8m): Raumlufffeuchte im Winter 40 %, Luftdichtheitsklasse (LDK) A, Höhe der zusammenhängenden Luftsäule 8 m
- 50/60 LDK B (8m): Raumlufffeuchte im Winter 50 %, Luftdichtheitsklasse (LDK) B, Höhe der zusammenhängenden Luftsäule 8 m
- 60/60 LDK C (8m): Raumlufffeuchte im Winter 60 %, Luftdichtheitsklasse (LDK) C, Höhe der zusammenhängenden Luftsäule 8 m
- 60/60 LDK C (16m): Raumlufffeuchte im Winter 60 %, Luftdichtheitsklasse (LDK) C, Höhe der zusammenhängenden Luftsäule 16 m

Abb. 32 links zeigt den Verlauf des Quotienten  $\gamma$  während des gesamten simulierten Zeitraums für verschiedene Feuchtelasten auf das untersuchte Flachdach. Abb. 32

rechts zeigt die zugehörigen Referenzmaterialfeuchten. Die Verläufe des letzten Simulationsjahrs sind jeweils detaillierter dargestellt.

Wie zu erkennen ist, steigt der Materialfeuchtequotient bei erhöhten Feuchtelasten (ab 60/60 LDK C 8 m) auf über 1,1 an. Auch die zugehörigen Referenzmaterialfeuchten steigen aufgrund der erhöhten Feuchtelasten auf über 18 M-% an.

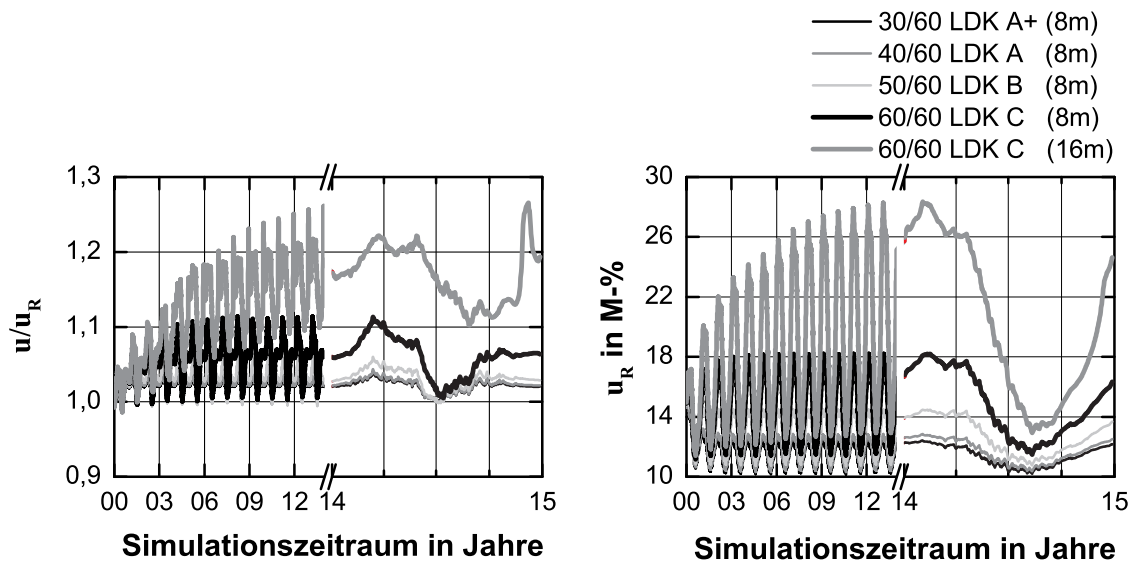


Abb. 32: Links: Materialfeuchtequotient während des gesamten Simulationszeitraums bei verschiedenen Feuchtelasten  
 Rechts: Referenzmaterialfeuchte des unbeschatteten Daches während des gesamten Simulationszeitraums bei verschiedenen Feuchtelasten

Anhand von Abb. 33 wird die Abhängigkeit des Materialfeuchtequotienten von der Referenzmaterialfeuchte ersichtlich. Bis auf die nicht eingeschwungene Variante mit der äußerst hohen Feuchtelast (60/60 LDK C (16m)) ist ein einheitlicher, deutlicher Zusammenhang zwischen der maximalen Referenzmaterialfeuchte und dem maximalen Materialfeuchtequotienten zu erkennen.

Bei der Variante 60/60 LDK C (8m) mit einer maximalen Referenzmaterialfeuchte von 18,2 % steigt der Materialfeuchtequotient auf 1,11 an.

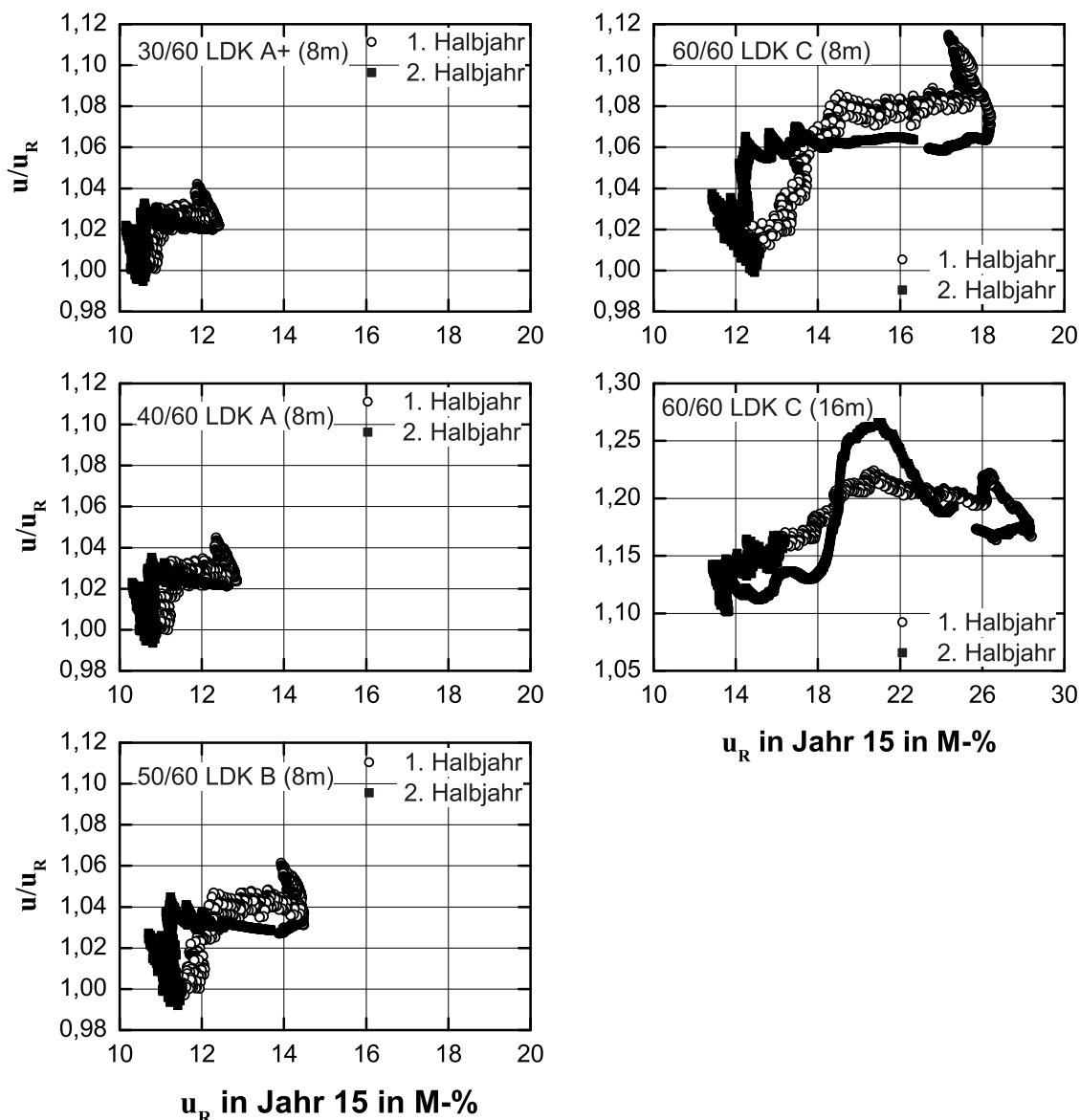


Abb. 33: Materialfeuchtequotienten in Abhängigkeit von der Referenzfeuchte  $u_R$  im letzten Simulationsjahr bei Variation der Feuchtelast

#### 4.2.3.4 Einfluss der Dampfbremse

Wie oben beschrieben, wird im Ansatz der Diffusionswiderstand der Konstruktionen mit  $a$  und  $a_{min}$  als ident angenommen. Beim Einsatz von feuchteadaptiven Dampfbremsen kann diese Vereinfachung jedoch zu Fehlern führen, da sich die relativen Luftfeuchten an der Dampfbremse zwischen besonnten und beschatteten Dachelementen aufgrund der Feuchteumverteilung deutlich unterscheiden, was wiederum zu unterschiedlichen  $s_d$ -Werten der FADAB führt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Dampfbremse auf den Materialfeuchtequotienten wird in den nachfolgenden Berechnungen der Einfluss der Feuchtelast durch Anpassen der konvektiven Feuchteinträge auf ähnliche Referenzfeuchten hin minimiert. Die sola-

ren Absorptionskoeffizienten werden auf  $a_{\min} = 0,6$  und  $a = 0,9$  festgelegt. Es wird ein Beschattungsbeginn am 21. Juni um 11 Uhr (Normalzeit) angenommen.

Nachfolgend wird der Einfluss folgender Dampfbremsen mit unterschiedlichen  $s_d$ -Werten auf den Materialfeuchtequotienten untersucht:

- I. Feuchteadaptive Dampfbremse Pro Klima Intello<sup>®</sup> (Spreizung im  $s_d$ -Wert 15,0 m – 0,03 m)
- II. Feuchteadaptive Dampfbremse Isover Vario<sup>®</sup> KM (Spreizung im  $s_d$ -Wert 4,5 m – 0,09 m)
- III. Dampfbremse mit konstantem  $s_d$ -Wert von 2 m

Abb. 34 links zeigt den Verlauf des Quotienten  $\gamma$  während des gesamten simulierten Zeitraums beim Einsatz verschiedener Dampfbremsen, Abb. 32 rechts zeigt die zugehörigen Referenzmaterialfeuchten. Die Verläufe des letzten Simulationsjahrs sind jeweils detaillierter dargestellt.

Anhand der Untersuchungen lässt sich kein maßgebender Unterschied im Materialfeuchtequotienten durch Variation der Dampfbremse erkennen. Die unterschiedliche Spreizung im  $s_d$ -Wert der feuchteadaptiven Dampfbremsen hat nur eine geringe Auswirkung auf diesen. Den höchsten Materialfeuchtequotienten von 1,085 erreicht die Variante mit  $s_d = 2$  m. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Variante eine etwas höhere Referenzfeuchte zeigt.

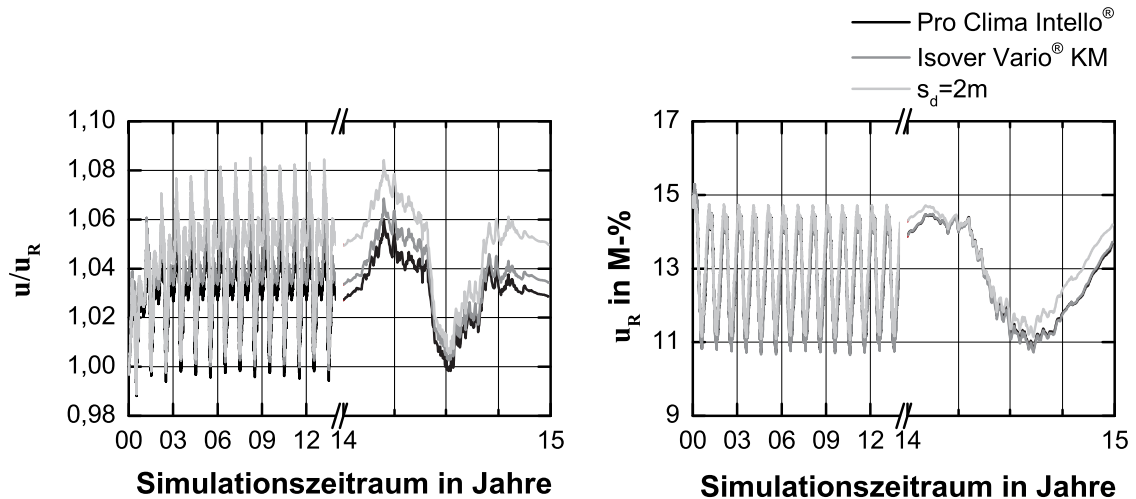


Abb. 34: Links: Materialfeuchtequotient während des gesamten Simulationszeitraums bei Verwendung zweier feuchteadaptiver Dampfbremsen mit unterschiedlich großer Spreizung im  $s_d$ -Wert und einer Dampfbremse mit konstantem  $s_d$ -Wert Rechts: Referenzmaterialfeuchte des unbeschatteten Daches während des gesamten Simulationszeitraums bei Verwendung der verschiedenen Dampfbremsen. Der konvektive Feuchteeintrag wurde auf ähnliche Referenzfeuchten hin modifiziert.

#### 4.2.3.5 Einfluss des Standorts

Der Standort des Daches beeinflusst durch die Außenlufttemperatur und die solare Einstrahlung den Feuchtehaushalt im Gefach. Vor allem der solaren Einstrahlung kommt im oben präsentierten Ansatz aufgrund des angenommenen Rücktrocknungszeitraums (01. April bis 31. September) eine wichtige Bedeutung zu. Zur Untersuchung des Einflusses des Standortes werden die Materialfeuchtequotienten der Dächer an folgenden Standorten ermittelt:

- I. Wien – Innere Stadt
- II. Klagenfurt
- III. Helsinki (FIN)

Abb. 35 zeigt die Klimabedingungen in den drei Städten wie sie für die Simulationen verwendet werden. Wie anhand der linken Grafik zu erkennen ist, herrschen in Helsinki nahezu während des ganzen Jahres deutlich kältere Außentemperaturen als in Wien und Klagenfurt. Auch die Strahlungsintensität liegt in Helsinki annähernd das ganze Jahr unter den Werten der beiden anderen Städte, was die rechte Grafik in Abb. 35 zeigt. Die Sommer sind in Helsinki deutlich kürzer. Wien und Klagenfurt weisen eine ähnliche Strahlungsintensität auf, jedoch sind die Temperaturen in Klagenfurt geringer als in Wien.

In den Simulationen wird der Einfluss der Feuchtelast durch Anpassen der konvektiven Feuchteinträge auf ähnliche Referenzfeuchten hin minimiert.

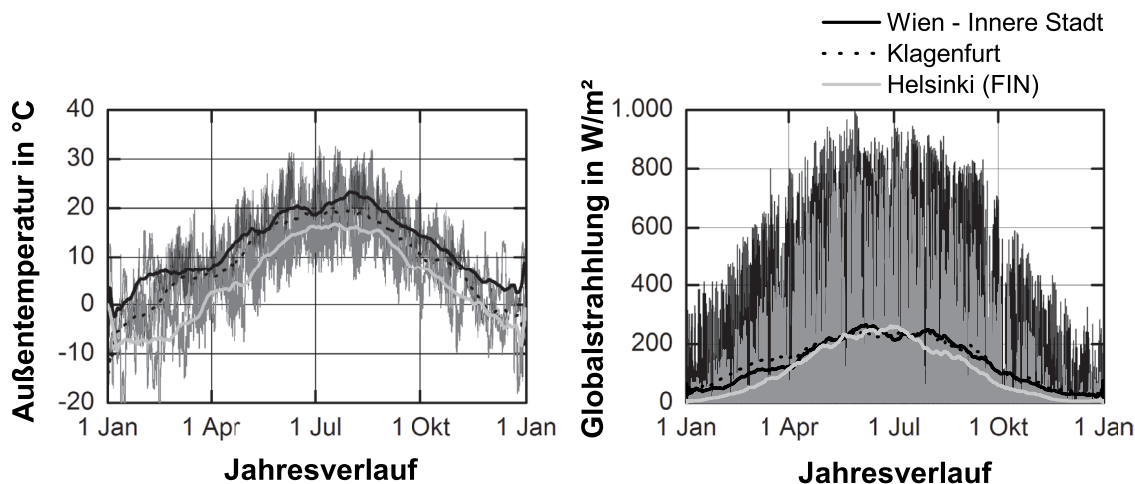


Abb. 35: Vergleich der Klimabedingungen (Stundenwerte und gleitende Monatsmittlerwerte) zwischen Wien – Innere Stadt, Klagenfurt und Helsinki (FIN), welche zur Ermittlung des Einflusses des Standorts verwendet werden.

Abb. 36 links zeigt den Verlauf des Quotienten  $\gamma$  während des gesamten simulierten Zeitraums für die Standorte Wien, Klagenfurt und Helsinki. Die Grafik rechts zeigt die zugehörigen Referenzmaterialfeuchten. Die Verläufe des letzten Simulationsjahrs sind jeweils detaillierter dargestellt. Wie zu erkennen ist, erzeugt das Klagenfurter Klima den

höchsten und jenes in Helsinki den geringsten Materialfeuchtequotienten. Dies kann ggf. auf die Differenz der Strahlungsintensitäten zurückgeführt werden. Der maximale Materialfeuchtequotient beträgt beim Klagenfurter Klima 1,07 bei einer maximalen Referenzfeuchte von 15,7 M-%.

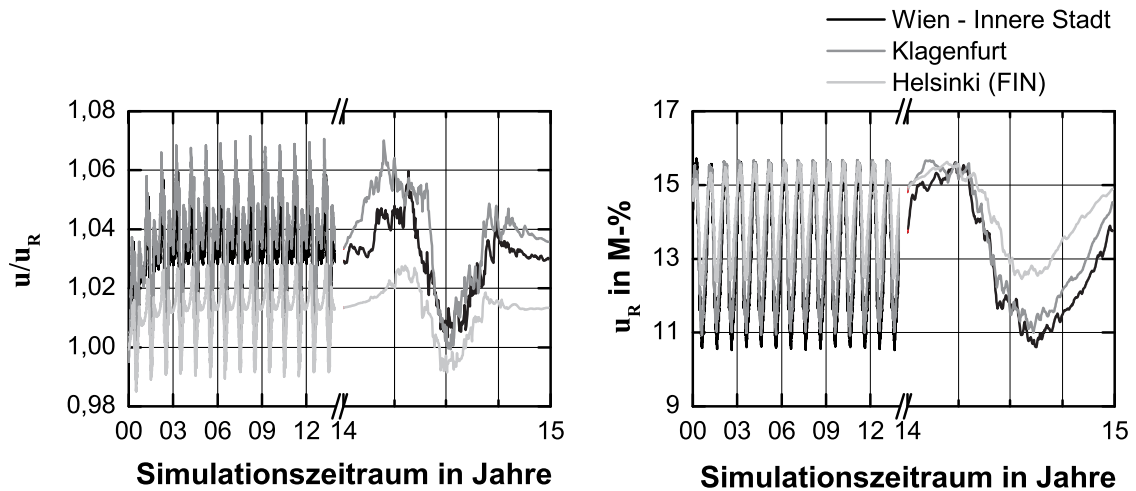


Abb. 36: Links: Materialfeuchtequotient während des gesamten Simulationszeitraums an unterschiedlichen Standorten  
 Rechts: Referenzmaterialfeuchte des unbeschatteten Daches während des gesamten Simulationszeitraums an unterschiedlichen Standorten. Der konvektive Feuchteeintrag wurde auf ähnliche Referenzfeuchten hin modifiziert.

#### 4.2.4 Tauglichkeitskriterium

Wie sich anhand der Sensitivitätsanalyse zeigt, hängt der Materialfeuchtequotient deutlich von der Feuchtelast ab. Bei Referenzmaterialfeuchten von  $u_{R,max} > 18$  M-% übersteigt die OSB-Materialfeuchte im beschatteten Dach jene im unbeschatteten Referenzdach um über 10 % relativ.

Als Tauglichkeitskriterium zur Bestimmung von  $a_{min}$  wird deshalb eine OSB-Materialfeuchte von  $u_{R,max} \leq 16$  M-% empfohlen. Die OSB-Materialfeuchte des beschatteten Daches liegt dann bei einer relativen Überschreitung von 10 % bei maximal 17,6 M-%, was dem in Abschnitt 2.5 hergeleiteten Grenzwert für OSB entspricht.



### 4.3 Konstruktionsempfehlungen

Um den Wissenstransfer bzgl. der wichtigen Einflussfaktoren auf Flachdächer und die daraus resultierenden Konstruktionsmodifikationen anwenderfreundlich für die Planungspraxis umzusetzen, entstand eine Broschüre zur Planung und Wartung flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen [Teibinger und Nusser (2010b)]. In dieser werden die notwendigen Grundlagen, durchzuführende Wartungstätigkeiten und konstruktive Lösungen zur Planung und zum Erhalt von hygrisch robusten hölzernen Dachkonstruktionen aufgeführt.

Den Kerninhalt der Planungsbroschüre bilden die in Abhängigkeit der Luftdichtheitsklassen, der Beschattungsbedingungen und des Innenklimas vorgeschlagenen hölzernen Flachdachkonstruktionen. Mit Hilfe des entwickelten Entscheidungsbaums in Abb. 37 können alle wichtigen Faktoren schnell und zielführend berücksichtigt werden.

In Anlehnung an Abschnitt 4.2 werden zur Definition der Anforderung an die Dachkonstruktionen in der Planungsbroschüre verschiedene „Beschattungsklassen“ eingeführt. Im Weiteren wird hierfür der besser bezeichnende Ausdruck „Beschattungsresistenzklassen“ (BRK) verwendet. In Tab. 6 sind die definierten Beschattungsresistenzklassen mit der jeweils maximal möglichen Beschattungsdauer angegeben. Die Beschattungsdauer darf zwischen Mitte Mai und Anfang August nicht überschritten werden.

Tab. 7 zeigt beispielhaft die Konstruktionsempfehlungen wie sie in der Planungsbroschüre wiedergegeben werden. In Abhängigkeit der notwendigen Beschattungsresistenzklasse werden der notwendige solare Absorptionskoeffizient der Dachbahn und die  $s_d$ -Werte der innenseitigen Beplankung sowie der Dampfbremse empfohlen.

Tab. 6: In der Planungsbroschüre definierte Beschattungsresistenzklassen mit maximal möglicher Beschattungsdauer zwischen Mitte Mai und Anfang August [Teibinger und Nusser (2010b)]

Beschattungsresistenzklasse (BRK)	Maximale Dauer der Beschattung
A	$\leq 4^1$ Std. / $\leq 6^2$ Std.
B	$\leq 2^1$ Std. / $\leq 4^2$ Std.
C	$\leq 1^1$ Std. / $\leq 2^2$ Std.
D	keine Beschattung zulässig!

<sup>1</sup> wenn 13 Uhr Ortszeit überschritten wird

<sup>2</sup> vor oder nach 13 Uhr Ortszeit

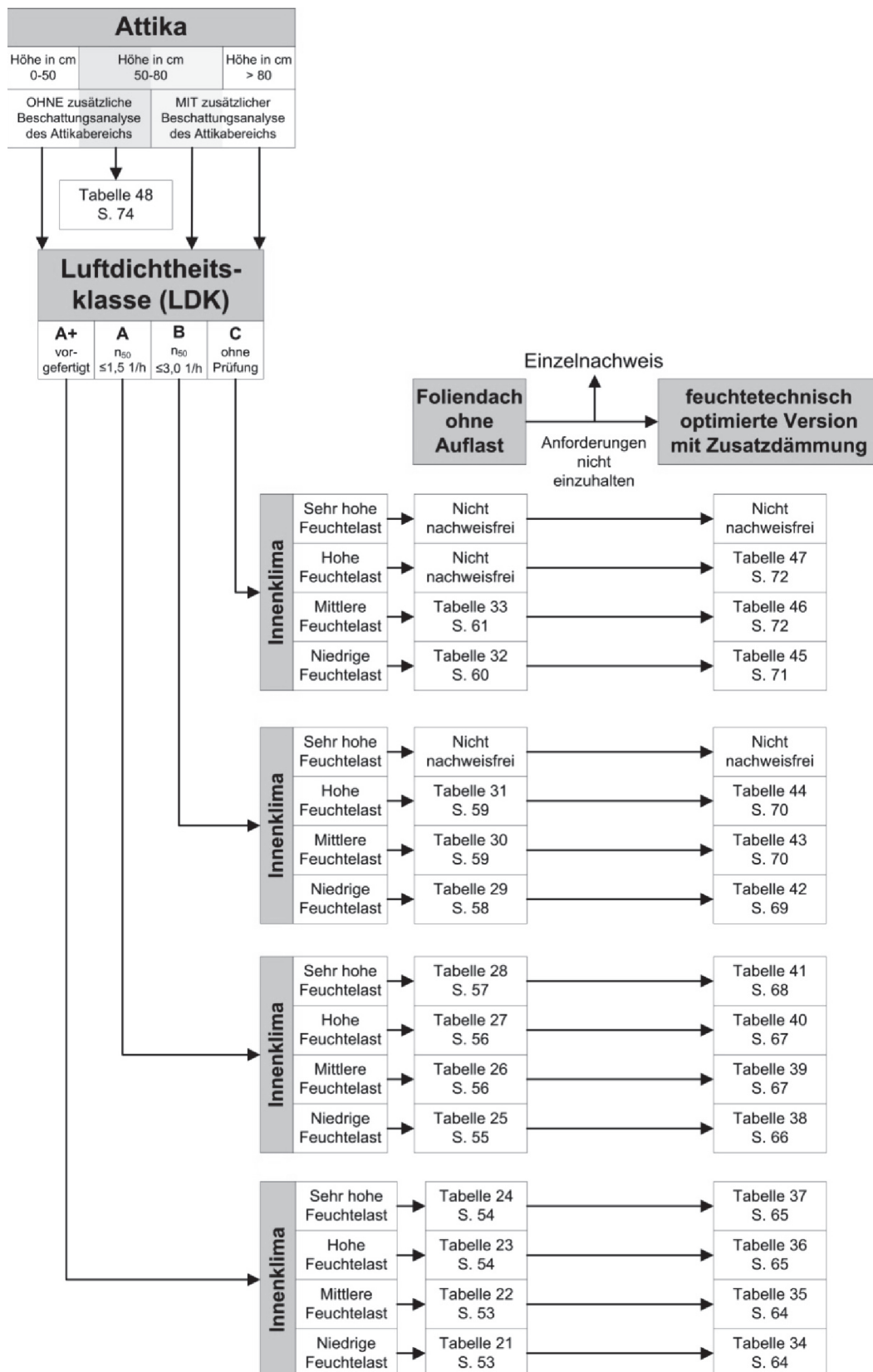


Abb. 37: In der Planungsbroschüre enthaltener Entscheidungsbaum zum Finden einer hygrothermisch tauglichen Flachdachkonstruktion [Teibinger und Nusser (2010b)]

Tab. 7: Beispielhafte Konstruktionsempfehlung in der Planungsbroschüre mit Bauteilkomponenten und resultierende Beschattungsresistenzklassen A-D für nachweisfreie vollgedämmte Foliendächer ohne Auflast für Dachelemente der LDK A und bei niedriger Feuchtlast im Innenraum [Teibinger und Nusser (2010b)]

inneren Beplankung	s <sub>d</sub> -Wert der Dampfbremse	Beschattungsresistenzklasse bei a der Dachbahn		
		0,6 ≤ a < 0,8 (z.B. hellgrün, hellgrau)	0,8 ≤ a < 0,9 (z.B. dunkelbraun, dunkelgrau)	a ≥ 0,9 (z.B. schwarz)
≤ 3.0 m (z.B. OSB, MDF, GKF)	S <sub>d(φ=30%)</sub> ≥ 3.5 m S <sub>d(φ=85%)</sub> ≤ 1.0 m		<b>D</b>	<b>C</b>
	S <sub>d(φ=30%)</sub> ≥ 9.0 m S <sub>d(φ=85%)</sub> ≤ 1.0 m	<b>D</b>	<b>B</b>	<b>A</b>
≤ 0.2 m (z.B. MDF, GKF)	2 m		<b>D</b>	<b>C</b>
	S <sub>d(φ=30%)</sub> ≥ 3.5 m S <sub>d(φ=85%)</sub> ≤ 1.0 m	<b>D</b>	<b>B</b>	<b>A</b>

Legende: gelb: mit dieser Dachbahn nicht nachweisfrei

grün: nachweisfrei für die angegebene Beschattungsresistenzklasse (Tab. 6)



## **5 Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse**

### **5.1 Neuerung gegenüber Stand des Wissens**

Anhand der experimentellen Untersuchungen werden die hygrothermischen Vorgänge in verschiedenen flachgeneigten Dachelementen aufgezeigt. Den bisher zumeist simulationsbasierten Studien stehen nun detaillierte Klima- und Materialfeuchtemesswerte aus dem Gefach der Dachelemente gegenüber. Durch die messtechnische Analyse der einzelnen Dachaufbauten wird der Einfluss von Faktoren wie einer vorhandenen Beschattungssituation, der Temperaturamplitudendämpfung und des Bewuchsgrades des Gründaches, der Durchfrostung des Gründachsubstrats, der Feuchtepufferung durch Zellulose und der Wirkung einer Hinterlüftungsebene oder von Metallbahnumbördelungen ersichtlich. Auch werden die hygrischen Auswirkung einer abgehängten Decke und der Einfluss der Dampfbremse und der innenseitigen Beplankung durch die gewonnenen Messdaten verdeutlicht.

Im gewählten Ansatz zur Quantifizierung von konvektiven Feuchteinträgen in Bauteile wird erstmals anhand einer statistischen Auswertung eine theoretische Leckagedichte für Umfassungskonstruktionen hergeleitet. Durch die definierten Luftdichtheitsklassen werden nun ebenfalls die Fertigungsbedingungen des Daches bei der Berechnung des konvektiven Feuchteintrags berücksichtigt.

Durch den neuen Ansatz zur Berücksichtigung von Beschattungssituationen kann die maximale Beschattungsdauer für jeden Beschattungsbeginn aufgrund der Azimutänderung der Sonne bestimmt werden, ohne jeweils eine hygrothermische Simulation unter Beachtung der Beschattung durchzuführen. Mit Hilfe des gezeigten Diagramms zu den maximalen Beschattungsdauern kann nun die Verwendbarkeit des Dachaufbaus für eine bestimmte Beschattungssituation schnell beurteilt werden.

Es werden erstmalig Konstruktionsempfehlungen für flachgeneigte Dächer aus Holz unter Berücksichtigung spezifischer konvektiver Feuchteinträge ausgesprochen. Ebenso wird zum ersten Mal eine mögliche Beschattung der Dachfläche sowie der solare Absorptionsgrad der Dachbahn bei der Auswahl der geeigneten Konstruktion bedacht. Mit Hilfe des präsentierten Entscheidungsbaumes kann der Planer alle Einflussfaktoren auf die Konstruktionswahl zielführend berücksichtigen.



## 5.2 Grenzen der gewonnenen Erkenntnisse

Die Freilanduntersuchungen wurden in Wien und somit bei eher mildem Außenklima durchgeführt. Für kältere Standorte können sich ggf. kritischere Klima- und Materialfeuchten in den Elementen einstellen. Aufgrund des gewählten Innenklimas und der dadurch erhöhten Feuchtelast wurden die Dachelemente jedoch trotzdem einer hohen hygrischen Belastung ausgesetzt.

Durch die Beschattungskonstruktion wird der Sichtfaktor zum Himmel und somit der langwellige Strahlungsaustausch mit der Umgebung deutlich reduziert. Hierdurch entstehen nachts, aufgrund der reduzierten Wärmeabstrahlung, etwas günstigere Bedingungen auf der Dachbahn/Eindeckung. Während des Tages erreicht aufgrund des niederen Sichtfaktors jedoch nur ein geringer Anteil der Diffusstrahlung die Dachoberfläche, wodurch wiederum etwas ungünstigere Bedingungen als ggf. im Realfall entstehen.

Alle experimentell untersuchten Dachelemente wurden auf Leckagen der innenseitigen Luftdichtheitsschicht hin geprüft. Ein konvektiver Feuchteeintrag in die Dachelemente mit Dampfbremse kann für den Zeitraum der Untersuchungen ausgeschlossen werden. Hierdurch werden im Vergleich zum Realfall optimierte jedoch besser quantifizierbare Randbedingungen erzeugt.

Der Ansatz zur Berücksichtigung von konvektiven Feuchteinträgen basiert auf einer statistischen Auswertung zu den potentiellen Durchdringungen und Verallgemeinerungen zum Leckagevolumenstrom durch diese. Auch wird eine zumindest gleiche Luftdichtheit an einer anderen Position im Gefach mit geringem anliegenden Luftdruck (Außenbereich, abgeschlossener Innenraum mit geringerem thermischen Auftrieb) vorausgesetzt. Nur so kann es zu einer Durchströmung des Gefaches mit Raumluft kommen.

Durch die so gewählten Annahmen besitzt der präsentierte Ansatz Unsicherheiten, welche jedoch aufgrund mangelnder Datenbasis nicht quantifiziert werden können. Zirkelbach et al. (2009) verwenden wie gezeigt einen anderweitigen Ansatz, die resultierenden Volumenströme sind jedoch mit jenen aus dem hier präsentierten Ansatz vergleichbar. Auch liegt die gewonnene Leckagestromfunktion im von Hens (2010) vorgeschlagenen Bereich.

Da der Ansatz auf dem Luftvolumenstrom durch ein nicht abgeklebtes Elektrokabel, welches eine Dampfbremse durchdringt, beruht, können große Leckagen wie Elementfugen oder größere Löcher in der Luftdichtheitsschicht hiermit nicht berücksichtigt werden.

Die eingeführten Luftdichtheitsklassen berücksichtigen u.a. die Luftdichtheit des Gebäudes, auf welchem die Dachelemente aufgebracht sind. Im gewählten Ansatz sinkt der konvektive Feuchteeintrag in die Konstruktion mit zunehmender Luftdichtheit des Gebäudes. Theoretisch ist es jedoch möglich, dass durch eine steigende Luftdichtheit des Gebäudes der thermische Auftrieb zunimmt, wodurch der konvektive Feuchteeintrag in

die Dachelemente ebenfalls ansteigt. Dieser Effekt wird im gewählten Ansatz nicht berücksichtigt.

Eine gute Luftdichtheit des Gebäudes kann auch auf eine hohe Fertigungsqualität der Dachelemente hindeuten, wie in Bachinger (2010) gezeigt wird. Durch die Reduktion des Leckagevolumenstroms bei Verbesserung des  $n_{50}$ -Wertes soll bei den ausführenden Betrieben zusätzlich das Bestreben nach einer besseren Gebäudeluftdichtheit gefördert werden.

Im Ansatz zur Berechnung der möglichen Beschattungsdauer wird die Besonnung des betrachteten Punktes durch die Änderung des Sonnenazimutes (Horizontalwinkel) ermöglicht. Eine Besonnung aufgrund des sich ändernden Höhenwinkels der Sonne sowie eine Beschattung an verschiedenen nicht zusammenhängenden Stunden des Tages wird beim verwendeten Ansatz nicht berücksichtigt.

Der zur Berechnung der Solarstrahlung bei Beschattungssituationen verwendete Sichtfaktor von 0,5 ist sehr gering gewählt. Dieser ist im Grunde nur für Punkte, welche direkt an einer schattenwerfenden Wand o.ä. liegen, gültig. Die Berechnung liegt dadurch zu meist auf der „sicheren Seite“. Nicht berücksichtigt werden mit diesem Sichtfaktor schattenwerfende Objekte, welche den betrachteten Punkt überragen, wie z.B. Vordächer oder PV-Anlagen.

Durch den gewählten Ansatz zur Berechnung der maximal möglichen Beschattungsdauer lassen sich die maximalen Materialfeuchten im beschatteten Dach nicht exakt festlegen. Nach der ausgesprochenen Empfehlung zum Tauglichkeitskriterium ( $u_{R,max} \leq 16 \text{ M-\%}$ ) liegt die maximale Materialfeuchte um bis etwa 10 % relativ darüber.

Wie gezeigt wird, hängt der Materialfeuchtequotient deutlich von der Feuchtelast auf das Dachelement ab. Bei hoher Feuchtelast entsteht in den beschatteten Dächern im Vergleich zu den besonnten Dächern deutlich mehr Feuchtigkeit. Um diese diffusiv abzutransportieren, muss der Diffusionsstrom in den beschatteten Dächern auch deutlich größer sein als in den besonnten, was im Ansatz nicht abgebildet wird. Ggf. kann dies durch einen passenden Korrekturfaktor berücksichtigt werden, welcher auf  $p_{v,Sat,(\theta_i^*)}$  in Gleichung (4.17) aufgeschlagen wird.

Die getätigte Sensitivitätsanalyse wurde noch nicht erschöpfend durchgeführt. So ist z.B. der Einfluss einer höheren Wärmekapazität des Daches noch nicht betrachtet worden. Eine allgemein gültige Aussage zur Verwendbarkeit des Ansatzes zur Berechnung der maximal möglichen Beschattungsdauer kann somit noch nicht gemacht werden.

Um die Planungsbroschüre in vollem Umfang einsetzen zu können, sind die Kennwerte der verwendeten Materialien notwendig. Vor allem der solare Absorptionsgrad der Dachbahn, im Optimalfall der gealterten, verschmutzten Dachbahn, ist selten vom Hersteller zu erfahren. Ebenfalls muss vor der Planung abgeschätzt werden, in welche Beschattungskategorie das Dachelement eingeordnet werden muss. Hierfür ist ggf. eine gesonderte Beschattungsanalyse mit geeigneter Software notwendig.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist es, die maßgebenden Faktoren zur Errichtung hygrisch robuster flachgeneigter Dachkonstruktionen in Holzbauweise zu erarbeiten, quantifizierbar zu machen und für die Planungspraxis aufzuarbeiten.

Anhand der durchgeführten Freilanduntersuchungen an 16 hölzernen Flachdachkonstruktionen können die wichtigen Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit dieser Dächer ermittelt und die hygrischen Vorgänge in den Gefachen analysiert werden. Es zeigt sich, dass geringe Dachoberflächentemperaturen, wie sie z.B. durch eine Beschattung oder einen Gründachaufbau auftreten, im Gefach zu lange andauernden, hohen relativen Luftfeuchten von  $\geq 80\%$  und dadurch zu erhöhten Materialfeuchten führen. Eine dauerhafte Beschattung wirkt sich deshalb äußerst negativ auf das hygrische Verhalten aller untersuchten Dachvarianten aus.

Durch die Verwendung von Dampfbremsen mit konstant hohem Diffusionswiderstand wird die Rücktrocknung von vorhandener Feuchtigkeit aus dem Gefach nahezu ausgeschlossen. Bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse kann eine Rücktrocknung im Gegensatz dazu nachgewiesen werden.

Eine feuchteadaptive Dampfbremse mit höherer Spreizung im  $s_d$ -Wert-Verlauf führt zu geringeren Feuchten im Gefach als eine feuchteadaptive Dampfbremse mit geringerer Spreizung.

Es kann ebenfalls ein Trend zu höheren Luftfeuchten im Gefach bei Verwendung einer OSB anstelle einer diffusionsoffenen MDF als innere Beplankung nachgewiesen werden.

Die Gründächer weisen wie die beschatteten Dachelemente ein eher kritisches Verhalten auf. Durch die fehlenden Trocknungsbedingungen sind diese Dächer wenig fehlertolerant.

Generell verhalten sich die untersuchten metallgedeckten Dächer mit quasi diffusionsoffenem Aufbau nach außen am günstigsten. Es zeigt sich, dass eine Dampfbremsbahn bei solchen Dächern nicht zwingend erforderlich ist, sondern diese bei einem beschattungsfreien Dach und einer geeigneten Eindeckung bzw. einer geeignete Hinterlüftung durch eine OSB ersetzt werden kann. Das hinterlüftete Dach weist bei den gegebenen Versuchsbedingungen – auch bei der dauerhaften Beschattung – das günstigste Verhalten auf.

Die untersuchten Dachvarianten können nach abnehmender hygrischer Robustheit somit folgendermaßen gereiht werden:

- A) Hinterlüftete Dächer
- B) Dächer mit Gleitbügelblecheindeckung
- C) Foliendächer ohne Auflast
- D) Gründächer

Der maßgebende Faktor zur Dauerhaftigkeit von hölzernen Dächern mit Dachabdichtung ist das vorhandene Rücktrochnungspotential. Die notwendige Ausprägung der Rücktrochnung hängt von der Feuchtelast auf die Konstruktion ab. Leckagen in der innenseitigen Luftdichtheitsschicht, welche sich unter baupraktischen Bedingungen nicht zu 100 % vermeiden lassen, erhöhen die notwendige Rücktrochnung. Beschattungen der Dachfläche hingegen führen zu einer reduzierten Rücktrochnung von Feuchtigkeit aus dem Gefach.

Konvektive Feuchteinträge sowie etwaige Beschattungssituationen müssen deshalb bereits bei der Planung von Dächern mit Dachabdichtung berücksichtigt werden.

Um die konvektiven Feuchteinträge zu quantifizieren wird anhand einer statistischen Auswertung von 646 Räumen eine theoretische Leckagedichte für Umfassungskonstruktionen und hieraus ein theoretischer Leckagevolumenstrom hergeleitet. Der Grad der konvektiven Feuchteinträge hängt u.a. von den Fertigungsbedingungen und von der Ausführungsqualität ab. Diese Faktoren werden durch die Definition von vier Luftdichtheitsklassen (LDK) A+, A, B und C berücksichtigt. Dächer der LDK A+ erfahren hierbei den geringsten und Dächer der LDK C den höchsten konvektiven Feuchteeintrag. Wie gezeigt wird, kann die Tauglichkeit der Konstruktion maßgeblich von der verwendeten Luftdichtheitsklasse abhängen.

Durch vorhandene Beschattungssituationen wird die Rücktrochnung von Feuchtigkeit aus dem Gefach stark reduziert. Anhand des präsentierten Ansatzes zur Bestimmung der maximal möglichen Beschattungsdauer kann die Tauglichkeit eines Dachaufbaus für spezifische Beschattungssituationen beurteilt werden. Hierfür ist lediglich eine Simulation des unbeschatteten Daches notwendig. Über den minimal notwendigen Rücktrochnungsdiffusionsstrom wird auf die maximal mögliche Beschattungsdauer geschlossen. Weitere hygrothermische Simulationen unter Berücksichtigung der jeweiligen Beschattungszeiten sind hierfür nicht notwendig.

In der Praxis kann die Beurteilung der Tauglichkeit der Dachkonstruktion durch die vorgestellte Grafik zu den maximal möglichen Beschattungsdauern erfolgen. Sobald – unabhängig vom Datum – die Uhrzeit des Beschattungsbeginns und die Dauer der Beschattung bekannt sind, kann die Konstruktion hiermit beurteilt werden.

Die entstandene Planungsbroschüre dient dazu, alle relevanten Faktoren bei der Planung von flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen praxisgerecht zu berücksichtigen. Der darin enthaltene Entscheidungsbaum führt den Planer gezielt zu der geeigneten Dachkonstruktion.

Um das empfohlene Tauglichkeitskriterium von  $u_{R,max} \leq 16 \text{ M-\%}$  auch für andere Parameterkonstellationen abzusichern, ist eine weiterführende Sensitivitätsanalyse durchzuführen, wobei jedenfalls der Einfluss der solaren Strahlungsintensität tiefergehend zu betrachten ist. Die erweiterte Sensitivitätsanalyse hat aufgrund der vielfältigen Varianten nach Möglichkeit mit einem automatisierten stochastischen Berechnungskonzept zu erfolgen [Holm (2001)].

Holm (2001) zeigt auch, dass die Oberflächenübergangswiderstände an den Bauteilgrenzen einen wichtigen Einfluss auf das hygrothermische Bauteilverhalten haben. Da schattenwerfende Objekte die Luftströmungsverhältnisse und somit den außenseitigen Wärmeübergangswiderstand am Dach beeinflussen können, sollte der Zusammenhang Beschattung-Wärmeübergangswiderstand in weiterführenden Studien untersucht werden.

Wie die Luftdichtheitsmessungen mit Tracergas an den Versuchsdächern verdeutlichen, weisen Dachelemente, welche als Dampfbremse lediglich eine OSB besitzen, im Vergleich zu Elementen, in denen eine Dampfbremsbahn verwendet wird, eine geringere Luftdichtheit auf. Inwieweit die geringere Luftdichtheit der OSB baupraktisch relevant ist, ist anhand weiterer Untersuchungen zu betrachten.

Bzgl. der Luftströmungsverhältnisse in Flachdächern besteht ebenfalls weiterer Forschungsbedarf. Die getätigten Messungen lassen auf Rotationsströmungen in den voll ausgedämmten Gefachen schließen. Wie sich diese bei einer Teildämmung des Gefaches, ggf. in Kombination mit einer Teilbeschattung durch eine Attika o.ä. auswirken, sollte in zukünftigen Forschungsarbeiten untersucht werden. Typische Schadensfälle an Flachdächern mit teilgedämmten Gefachen wurden z.B. von Mohrmann (2007) und Oswald (2009) dokumentiert.



## 7 Literaturverzeichnis

- APA (2005): *Buckling of Wood Structural Panel Sheating*. APA, (Technical Note, D481).
- APA (2006): *Moisture-Related Dimensional Stability*. APA, (Technical Topics, TT-028A).
- Bachinger, J. (2010): *Feuchteverhalten von Flachdachaufbauten im Holzleichtbau. Insbesondere von nicht hinterlüfteten Flachdächern, deren Dämm- und Trägerebene zwischen Dampfsperre /-bremse und Dachhaut angeordnet ist*. Dissertation, Wien, TU Wien, Fakultär für Architektur und Raumplanung.
- Bludau, C.; Künzle, H. M.; Zirkelbach, D. (2010a): *Hygrothermal Performance of Flat Roofs with Construction Moisture*. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI, December 5-9, Clearwater Beach, Florida, Proceedings.
- Bludau, C.; Schmidt, T.; Künzle, H. M. (2010b): *Hygrothermal effects in lightweight roofs shaded by PV-elements*. Thermophysics, November 3-5, Valtice, Czech Republic, Proceedings, S. 56–62.
- Bludau, C.; Zirkelbach, D.; Künzle, H. M. (2008): *Surface Temperatures on Flat Roofs and Hygrothermal Consequences*. Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries - NSB, June 16-18, S. 213–220.
- Carll, C. G.; Wiedenhoft, A. C. (2009): *Moisture-Related Properties of Wood and the Effects of Moisture on Wood and Wood Products*. Moisture Control in Buildings. The Key Factor in Mold Prevention. 2. Aufl., ASTM International, S. 54–79.
- Derome, D. (2005): *Moisture Accumulation in Cellulose Insulation Caused by Air Leakage in Flat Wood Frame Roofs*. Journal of Thermal Envelope and Building Science, Jg. 28, H. 3, S. 269–287.
- DIN 68800-2, 2009-11: *Holzschutz; Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau [ENTWURF]*. Deutsches Institut für Normung.
- Djebbar, R.; van Reenen, D. et al. (2003): *Envelope air pressure design load: an approach for hygrothermal analysis of retrofitted high-rise masonry wall assemblies*. National Research Council of Canada CRC, Institut for Research in Construction, Ottawa, Ontario, Canada, (Forschungsbericht, NRCC-46111).
- Du, Q. P.; Geissen, A.; Noack, D. (1991): *Die Genauigkeit der elektrischen Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip*. Holz als Roh- und Werkstoff, Jg. 49, S. 1–6.
- Etheridge, D.; Sandberg, M. (1996): *Building Ventilation. Theory and Measurement*. John Wiley and Sons Ltd.
- Finkensteiner (jetzt Fülle), C.; Fechner, H.; Häupl, P. (2006): *Modellierung von kurzweiliger solarer Strahlung bei der hygrothermischen Bauteilsimulation – numerische Lösung und analytischer Ansatz*. Bauphysik, Jg. 28, H. 1, S. 1–12.
- Fitz, C.; Krus, M.; Zillig, W. (2004): *Untersuchungen zum Feuchteschutz von Leichtbaukonstruktionen mit Bauplatten aus Holzwerkstoffen*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Bericht, HTB-10/2004).
- Fuhrmann, W. (2003): *Luft- und Winddichtheit von Holzhausbauten. Einfluss der Konstruktionsarten und Ausbaustufen*. 2. Aufl., Holzforschung Austria, Wien, (Forschungsbericht, HFA-Nr.: 357).

- Geißler, A. (2001): *Auswertung von Messergebnissen zur Luftdichtheit von Gebäuden*. GesundheitsIngenieur, Jg. 122, H. 1, S. 31–37.
- Geißler, A.; Hauser, G. (2002): *Abschätzung des Risikopotentials infolge konvektiven Feuchtetransports*. Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik, (Forschungsbericht, AIF-Nr.:12764).
- Gjinolli, A. E.; Vogt, J. J. (2006): *In Service Moisture Problems and Structural Performance of OSB Panels*. World Conference on Timber Engineering - WCTE, August 6-10, Portland, OR, USA, Proceedings.
- Gonin, M.-A.; Weber, H.; Blaser, C. (2003): *Hohlkastenelemente als Tragkonstruktion für Dächer*. Schweizer Hochschule für die Holzwirtschaft, Biel, Schweiz, (Forschungsbericht, 2613-HB-01).
- Hall, M.; Hauser, G. (2003): *In situ Quantifizierung von Leckagen bei Gebäuden in Holzbauart*. Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik, (Forschungsbericht, AIF-Nr. 12611 N).
- Häupl, P.; Petzold, H. (2007): *Hygrothermische Untersuchungen an begrünten Flachdächern*. 12. Bauklimatisches Symposium, 29.-31. März., Dresden, Tagungsband, S. 893–900.
- Hens, H. S. (2007): *Building Physics - Heat, Air and Moisture. Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Ernst, Wilhelm & Sohn.
- Hens, H. S. (2010): *Applied Building Physics. Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties*. Ernst, Wilhelm & Sohn.
- Holm, A. (2001): *Ermittlung der Genauigkeit von Instationären thermischen Bauteilbrechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes*. Dissertation, Universität Stuttgart, Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Holzabsatzfond (Hg.) (2008): *Flachdächer in Holzbauweise*. Informationsdienst Holz Spezial, H 555.
- Hukka, A.; Viitanen, H. (1999): *A mathematical model of mould growth on wooden material*. Wood Science and Technology, Jg. 33, H. 6, S. 475–485.
- Janssens, A. (1998): *Reliable control of interstitial condensation in lightweight roof systems, calculation and assessment methods*. Dissertation, Catholic University Leuven, Belgium.
- Jenisch, R.; Schüle, W. (1973): *Die Austrocknung der Baufeuchte bei nicht belüfteten Flachdächern*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 6).
- Kalamees, T. (2007): *Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia*. Building and Environment, Jg. 42, H. 6, S. 2369–2377.
- Kalamees, T.; Korpi, M. et al. (2008): *The distribution of the air leakage places and thermal bridges in Finnish detached houses and apartment buildings*. Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. - NSB, June 16-18, S. 1095–1102.
- Kaufmann, P. (1999): *Extensiv begrünte Flachdächer - ein Gewinn für die Siedlungsentwässerung*. Berner Fachhochschule Architektur Bau und Holz HSB, Burgdorf, Biel, Abteilung Bauingenieurwesen.
- Künzel, H. (1978): *Feuchtigkeitshaushalt bei Flachdächern mit Dampfsperren und Dachbahnen aus PVC-weich*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 34).

- Künzel, H. M. (1994): *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Dissertation, Universität Stuttgart, Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Künzel, H. M. (1995): *Vorsicht bei nachträglicher Steildachdämmung*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 269).
- Künzel, H. M. (1999a): *Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser - quo vadis*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 355).
- Künzel, H. M. (1999b): *Einfluß der Deckschicht auf die Temperaturverhältnisse in Flachdächern*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 354).
- Künzel, H. M.; Großkinsky, T. (1998): *Feuchtesicherheit unbelüfteter Blechdächer; auf die Dampfbremse kommt es an!* WKSB, Jg. 43, H. 42, S. 22–27.
- Künzel, H. M.; Kaufmann, A. (1995): *Feuchteadaptive Dampfbremse für Gebäudedämmungen*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 268).
- Künzel, H. M.; Zirkelbach, D.; Schafaczek, B. (2010): *Berücksichtigung der Wasserdampfkonvektion bei der Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen*. WKSB, H. 63, S. 25–33.
- Mattsson, B. (2007): *Studies on building air leakage. A transient pressurisation method, measurements and modelling*. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Mohrmann, M. (2007): *Feuchteschäden beim Flachdach*. Holzbau - die neue quadriga, H. 3, S. 13–17.
- Montensen-Hedegaard, L.; Rode, C.; Peuhkuri, R. H. (2005): *Full scale tests of moisture buffer capacity of wall materials*. The 7th Nordic Building Physics Symposium - NSB, June 13-15, Reykjavik, Iceland, Proceedings.
- Niemz, P.; Poblete, H. et al. (2004): *Einfluss der hydrothermischen Behandlung von Pinus radiata D. Don auf ausgewählte Eigenschaften des Holzes*. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, Jg. 155, H. 12, S. 540–543.
- Niemz, P.; Sonderegger, W. (2009): *Untersuchungen zum Sorptionsverhalten von Holzwerkstoffen*. Bauphysik, Jg. 31, H. 4, S. 244-149.
- Nusser, B.; Neubauer, G.; Polleres, S. (2008): *Angewandte Bauforschung. Forschungsgebäude zu hygrothermischen Bauteiluntersuchungen unter Realbedingungen errichtet*. HFA-Magazin, Jg. 6, H. 1, S. 3–5.
- ÖNORM B 3802-2, 1998-04-01: *Holzschutz im Hochbau - Chemischer Schutz des Holzes*. Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM EN ISO 13788, 2002-01-01: *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren*. Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM CEN/TS 12872, 2007-10-01: *Holzwerkstoffe - Leitfaden für die Verwendung von tragenden Platten in Böden, Wänden und Dächern [VORNORM]*. Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM B 2215, 2009-07-15: *Holzbauarbeiten - Werkvertragsnorm*. Österreichisches Normungsinstitut.
- Oswald, R. (2009): *Fehlgeleitet*. deutsche bauzeitung, H. 7, S. 74–79.
- Richter, E.; Fischer, H.-M. et al. (2008): *Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*. Vieweg + Teubner.

- Rick, A. W. (1958): *Das flache Dach. Baustoffliche, bauphysikalische und ausführungstechnische Gedanken zur Gestaltung flacher Dächer*. Heidelberg, Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsgesellschaft.
- Roßbach, S. (2007): *Feuchteberechnung von Flachdächern in Holzbauweise*. Diplomarbeit, Hochschule Biberach.
- Schmidt, J.; Kornadt, O. (2010): *Convective Moisture Transfer through Walls and Wall Components*. First European Conference on Moisture Measurement - Aquametry, October 5-7, Weimar, Bd. 1, S. 527–534.
- SdW: *Sonnenstandsdiagramm Wien*. Online verfügbar unter [http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Sonnenstandsdiagramm\\_Wien.png](http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Sonnenstandsdiagramm_Wien.png), zuletzt geprüft am 29.12.2011.
- Sedlbauer, K. (2001): *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. Dissertation, Universität Stuttgart, Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Sedlbauer, K.; Schnuck, E. et al. (2010): *Flachdach Atlas. Werkstoffe, Konstruktionen, Nutzungen*. 1. Aufl., Birkhäuser Verlag.
- Sonderegger, W.; Niemz, P. (2003): *Untersuchung zur Quellung und Wärmeausdehnung an ausgewählten Faser-, Span- und Furnier-Holzwerkstoffen*. ETH-Zürich, Professur Holzwissenschaft, (Forschungsbericht, ETHZ/HW-HP-LZfP Nr. 17).
- SVDW (Hg.) (2007): *Feuchteschutz bei Flachdächern in Holzbauweise*. Schweizer Verband Dach und Wand. Uzwil, Schweiz, (Merkblatt, FD 2/07).
- Teibinger, M.; Nusser, B. (2010a): *Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen* Holzforschung Austria. Wien. (Forschungsbericht, HFA-Nr.: P412).
- Teibinger, M.; Nusser, B. (2010b): *Planungsbroschüre. Flachgeneigte Dächer aus Holz*. Wien, Eigenverlag, (HFA-Schriftenreihe, 29).
- TenWolde, A.; Carll, C. G.; Malinauskas, V. (1998): *Air pressures in wood frame walls. Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference, December 6-10, Clearwater Beach, Florida, Proceedings*, S. 665–675.
- Viitanen, H. (1996): *Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time*. Dissertation, Uppsala. Swedish Univ. of Agricultural Science Dept. of Forest Products.
- Wakili, K. G.; Frank, T. (2003): *Feuchteadaptive Dampfbremsen. Spezialfragen der Bauphysik*. Veranstaltung vom 12. Dezember, ETH Zürich.
- Wakili, K. G.; Frank, T. (2004): *A Humidity Dependent Vapour Retarder in Non-ventilated Flat Roofs. In Situ Measurements and Numerical Analysis*. Indoor and Built Environment, Jg. 13, H. 6, S. 433–441.
- Wilson, A. G. (1961): *Air Leakage in Buildings*. National Research Council of Canada CRC, (Canadian Building Digest, CBD-23).
- Winter, S.; Fülle, C.; Werther, N. (2009): *Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flach geneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer dampfdichter Abdichtung unter Einsatz ökologischer Bauprodukte zum Erreichen schadensfreier, markt- und zukunftsgerichteter Konstruktionen*. Leipzig, (Forschungsbericht, DGFH: Z 6 - 10.08.18.7-07.18).
- WTA-Merkblatt 6-2-01/D, 2002: *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse*. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

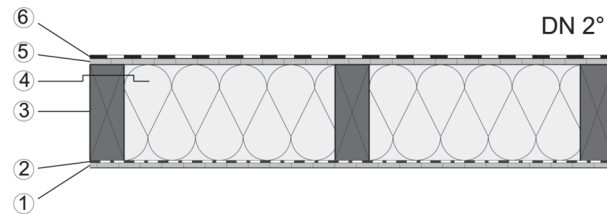
Zirkelbach, D.; Künzle, H. M. et al. (2009): *Dampfkonvektion wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen*. 4th International Symposium on Building and Ductwork Airtightness - BUILDAIR, October 1-2, Berlin, Proceedings.

Zürcher, C.; Frank, T. (2010): *Bauphysik. Bau und Energie*. 3. Aufl., vdf Hochschulvlg.



## A.1 Aufbau der experimentell untersuchten Dächer

Tab. A-1: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 1



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ in W/(m <sup>2</sup> *K)	$\mu$
1	MDF	15	510 <sup>1</sup>	0,09 <sup>1</sup>	11 <sup>1</sup>
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima DB+)	0,3 <sup>1</sup>	643 <sup>1</sup>	-	2.000-14.000 <sup>1</sup>
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
4	Glaswolle	2x 140	14,5 <sup>1</sup>	0,038 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>
5	OSB/3	18	600 <sup>1</sup>	0,13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 <sup>1</sup>	1400 <sup>1</sup>	-	58.000 <sup>1</sup>

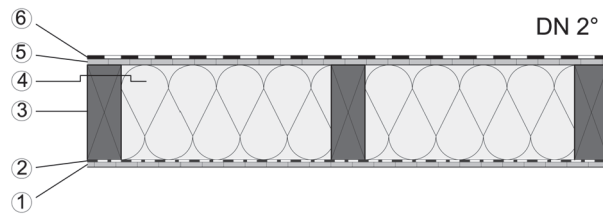
<sup>1</sup>Herstellerangaben <sup>2</sup>www.masea-ensan.com (http://153.96.181.7)

Tab. A-2: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 2

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ in W/(m <sup>2</sup> *K)	$\mu$
1	OSB3	15	600 <sup>1</sup>	0,13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima DB+)	0,3 <sup>1</sup>	643 <sup>1</sup>	-	2.000-14.000 <sup>1</sup>
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
4	Glaswolle	2x 140	14,5 <sup>1</sup>	0,038 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>
5	OSB/3	18	600 <sup>1</sup>	0,13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 <sup>1</sup>	1400 <sup>1</sup>	-	58.000 <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Herstellerangaben <sup>2</sup>www.masea-ensan.com (http://153.96.181.7)

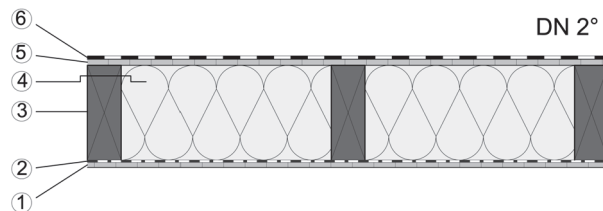
Tab. A-3: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 3



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ in W/(m <sup>2</sup> *k)	$\mu$
1	MDF	15	510 <sup>1</sup>	0.09 <sup>1</sup>	11 <sup>1</sup>
2	Feuchtheadaptive Dampfbremse (pro clima INTELLO®)	0.2 <sup>1</sup>	500 <sup>1</sup>	-	150-75.000 <sup>1</sup>
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
4	Glaswolle	2x 140	14,5 <sup>1</sup>	0.038 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>
5	OSB/3	18	600 <sup>1</sup>	0.13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 <sup>1</sup>	1400 <sup>1</sup>	-	58.000 <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Herstellerangaben <sup>2</sup>www.masea-ensan.com (http://153.96.181.7)

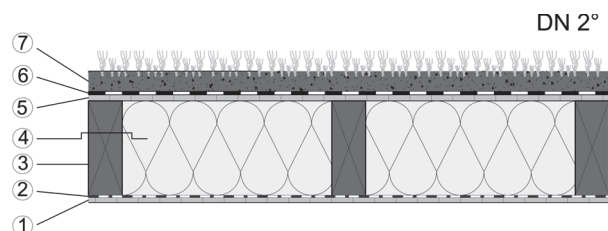
Tab. A-4: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 4



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ in W/(m <sup>2</sup> *k)	$\mu$
1	OSB/3	15	600 <sup>1</sup>	0.13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
2	Feuchtheadaptive Dampfbremse (pro clima INTELLO®)	0.2 <sup>1</sup>	500 <sup>1</sup>	-	150-75.000 <sup>1</sup>
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
4	Glaswolle	2x 140	14,5 <sup>1</sup>	0.038 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>
5	OSB/3	18	600 <sup>1</sup>	0.13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 <sup>1</sup>	1400 <sup>1</sup>	-	58.000 <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Herstellerangaben <sup>2</sup>www.masea-ensan.com (http://153.96.181.7)

Tab. A-5: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau W



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ in W/(m <sup>2</sup> *k)	$\mu$
1	MDF	15	510 <sup>1</sup>	0.09 <sup>1</sup>	11 <sup>1</sup>
2	ISOCELL FH Vliesdampfbremse	0.3 <sup>1</sup>	300 <sup>1</sup>	-	7.350 <sup>1</sup>
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
4	Zellulose eingeblasen	280	38-65 <sup>1</sup>	0.038 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>
5	OSB/3	18	600 <sup>1</sup>	0.13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 <sup>1</sup>	1400 <sup>1</sup>	-	58.000 <sup>1</sup>
7	Schutzvlies + extensive Begrünung	10+70	-	-	-

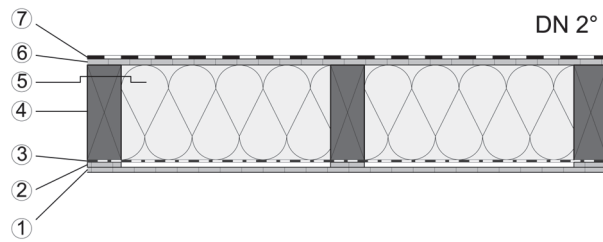
<sup>1</sup>Herstellerangaben <sup>2</sup>www.masea-ensan.com (<http://153.96.181.7>)

Tab. A-6: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 5

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ in W/(m <sup>2</sup> *k)	$\mu$
1	MDF	15	510 <sup>1</sup>	0.09 <sup>1</sup>	11 <sup>1</sup>
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima INTELLO®)	0.2 <sup>1</sup>	500 <sup>1</sup>	-	150-75.000 <sup>1</sup>
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
4	Glaswolle	2x 140	14,5 <sup>1</sup>	0.038 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>
5	OSB/3	18	600 <sup>1</sup>	0.13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 <sup>1</sup>	1400 <sup>1</sup>	-	58.000 <sup>1</sup>
7	Schutzvlies + extensive Begrünung	10+70	-	-	-

<sup>1</sup>Herstellerangaben <sup>2</sup>www.masea-ensan.com (<http://153.96.181.7>)

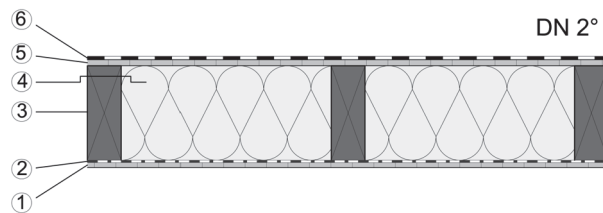
Tab. A-7: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 6



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ in W/(m <sup>2</sup> K)	$\mu$
1	OSB/3	15	600 <sup>1</sup>	0.13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
2	Unterkonstruktion (OSB3-Streifen)	15	600 <sup>1</sup>	0.13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
3	Feuchtheadaptive Dampfbremse (pro clima DB+)	0.3 <sup>1</sup>	643 <sup>1</sup>	-	2.000-14.000 <sup>1</sup>
4	KVH-Fichte	100 x 280	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
5	Glaswolle	2x 140	14,5 <sup>1</sup>	0.038 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>
6	OSB/3	18	600 <sup>1</sup>	0.13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
7	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 <sup>1</sup>	1400 <sup>1</sup>	-	58.000 <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Herstellerangaben <sup>2</sup>www.masea-ensan.com (http://153.96.181.7)

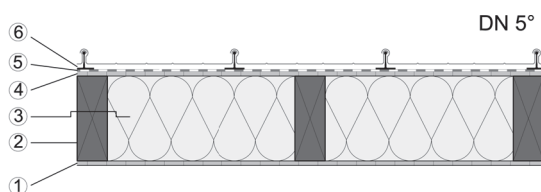
Tab. A-8: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 7



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ in W/(m <sup>2</sup> K)	$\mu$
1	MDF	15	510 <sup>1</sup>	0.09 <sup>1</sup>	11 <sup>1</sup>
2	PE-Folie	0.2 <sup>1</sup>	-	-	> 500.000 <sup>1</sup>
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
4	Glaswolle	2x 140	14,5 <sup>1</sup>	0.038 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>
5	OSB/3	18	600 <sup>1</sup>	0.13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 <sup>1</sup>	1400 <sup>1</sup>	-	58.000 <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Herstellerangaben <sup>2</sup>www.masea-ensan.com (http://153.96.181.7)

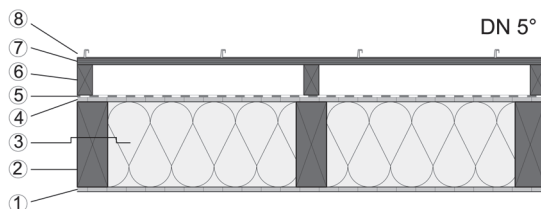
Tab. A-9: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 8



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ in W/(m <sup>2</sup> *k)	$\mu$
1	OSB/3	15	600 <sup>1</sup>	0.13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
2	KVH-Fichte	100 x 280	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
3	Glaswolle	2x 140	14,5 <sup>1</sup>	0.038 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>
4	MDF	15	510 <sup>1</sup>	0.09 <sup>1</sup>	11 <sup>1</sup>
5	Unterdachbahn für erhöhte Regensicherheit	0,8 <sup>1</sup>	500 <sup>1</sup>	-	62,5 <sup>1</sup>
6	Gleitbügelblecheindeckung silbern	1 <sup>1</sup>	-	-	-

<sup>1</sup>Herstellerangaben <sup>2</sup>www.masea-ensan.com (<http://153.96.181.7>)

Tab. A-10: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 9



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	$\rho$ in kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ in W/(m <sup>2</sup> *k)	$\mu$
1	OSB/3	15	600 <sup>1</sup>	0.13 <sup>1</sup>	165 <sup>2</sup>
2	KVH-Fichte	100 x 280	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
3	Glaswolle	2x 140	14,5 <sup>1</sup>	0.038 <sup>1</sup>	1 <sup>1</sup>
4	MDF	15	510 <sup>1</sup>	0.09 <sup>1</sup>	11 <sup>1</sup>
5	Unterdachbahn für erhöhte Regensicherheit	0,8 <sup>1</sup>	500 <sup>1</sup>	-	62,5 <sup>1</sup>
6	Unterkonstruktion Fichte	100	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
7	Rauh Schalung Fichte	22	455 <sup>2</sup>	0,09 <sup>2</sup>	130 <sup>2</sup>
8	Stehfalzblech dunkel	1 <sup>1</sup>	-	-	-

<sup>1</sup>Herstellerangaben <sup>2</sup>www.masea-ensan.com (<http://153.96.181.7>)



## A.2 Eingesetzte Messtechnik

Tab. A-11: Eingesetzte Mess- und Regelungstechnik

Bezeichnung	Typ	Messgenauigkeit
Messanlage	ALMEMO® 5690-1M09	-
Kapazitiver Luftfeuchte- und Temperatur-Kombifühler	ALMEMO® FHA646-E1 & FHA646-E1C	± 2 % r.LF. ± 0,1 K
Thermoelemente NiCr-Ni	ALMEMO® T190-2 PVC & T190-10 Teflon	± 2,5 K
Sensor für Luftkontaminationen	FIGARO® TGS 2600	k.A.
Materialfeuchtemessgerät	Brookhuis® FMD6	± 1,0 M-% bei Fichte mit Zielfeuchte 12,7 M-%
Ultraschallvernebler	Seliger® Fogstar 300	-



## A.3 Publikationen

### A.3.1 Aufsatz I

#### **Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung**

##### **Teil 1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung**

*Bernd Nusser, Martin Teibinger, Thomas Bednar*

In: Bauphysik, Jg. 32 (2010), H. 3, S. 132–143

Aufgrund von Copyright-Bestimmungen ist dieser Aufsatz nur in der approbierten Originalversion der Arbeit enthalten.



## A.3.2 Aufsatz II

### **Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung**

#### **Teil 2: Nicht belüftete, extensiv begrünte Dächer mit Zellulose- und Mineralwollämmung**

*Bernd Nusser, Martin Teibinger, Thomas Bednar*

In: Bauphysik, Jg. 32 (2010), H. 4, S. 219–226

Aufgrund von Copyright-Bestimmungen ist dieser Aufsatz nur in der approbierten Originalversion der Arbeit enthalten.



### A.3.3 Aufsatz III

#### **Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung**

##### **Teil 3: Hinterlüftete und nicht hinterlüftete Metalldächer**

*Bernd Nusser, Martin Teibinger, Thomas Bednar*

In: Bauphysik, Jg. 32 (2010), H. 5, S. 288–295

Aufgrund von Copyright-Bestimmungen  
ist dieser Aufsatz nur in der approbierten  
Originalversion der Arbeit enthalten.



### A.3.4 Publikationsliste

Nachfolgende Auflistung beinhaltet alle Publikationen welche im Zuge der durchgeführten Forschungsarbeit entstanden sind. Die Auflistung erfolgt abnehmend chronologisch.

Nusser, B.; Teibinger, M. (2011): *Gründach versus Foliendach. Leistungsvergleich und Maßnahmen zur Verbesserung der hygrischen Sicherheit*. Holzbau - die neue quadriga, H. 5, S. 13–17.

Teibinger, M.; Nusser, B. (2011): *Flachgeneigte Dächer aus Holz*. mikado plus, mikado Sonderheft Nr. 3.

Nagl, S.; Nusser, B. (2011): *Viel Licht und wenig Schatten*. HFA-Magazin, H. 2, S. 8–9.

Teibinger, M.; Nusser, B. (2011): *Das hygrische Verhalten von flachgeneigten Foliendächern*. Ernst & Sohn Spezial: Flachdächer, H. A 61029, S. 50–51.

Nusser, B.; Bednar, T.; Teibinger, M. (2011): *Proposal for a modified Glaser-Method for the risk assessment of flat timber roofs*. 9th Nordic Symposium on Building Physics – NSB, Tampere, Finland, 29 May – 2 June, Proceedings, Bd. 1, S. 181–188.

Nusser, B. (2011): *Tatort Dampfbremse. Einfluss von konvektiven Feuchteinträgen und temporären Beschattungen auf Foliendächer*. Bauphysikforum, 7.-8. April, Mondsee, Tagungsband, S. 35–44, (HFA-Schriftenreihe, 32).

Teibinger, M.; Nusser, B. (2010): *Planungsbroschüre. Flachgeneigte Dächer aus Holz* Wien, Eigenverlag, (HFA-Schriftenreihe, 29).

Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung - Teil3: Hinterlüftete und nicht hinterlüftete Metaldächer*. Bauphysik, Jg. 32, H. 5, S. 288–295.

Nusser, B.; Bednar, T.; Teibinger, M. (2010): *Euro-Glaser unter Beachtung solarer Strahlungs-/ Absportionsbedingungen sowie druckinduzierter Feuchteinträge im Vergleich zu dynamischen Simulationen*. Building Performance Simulation in a Changing Environment, Proceedings of the third German-Austrian IBPSA Conference, September 22-24, Wien, S. 535–541.

Bednar, T.; Deseyve, C.; Jung, M.; Nusser, B.; Teibinger, M. (2010): *Impact of Airflow on the Risk Assessment of Flat Roofs*. The 7th International Conference in Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings – IAQVEC, August 15-18, Syracuse, New York, USA, Proceedings.

Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung - Teil 2: Nicht belüftete, extensiv begrünte Dächer mit Zellulose- und Mineralwollämmung*. Bauphysik, Jg. 32, H. 4, S. 219–226.

Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Low-Pitched Timber Roofs*. World Conference on Timber Engineering - WCTE. June 20-24, Riva del Garda, Italy, Proceedings.

Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung - Teil 1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung*. Bauphysik, Jg. 32, H. 3, S. 132–143.

Teibinger, M.; Nusser, B. (2010): *Flachgeneigte Dächer in Holzbauweise richtig ausgeführt. Do's and Dont's aus bauphysikalischer Sicht*. 6. IFB Symposium - Flachdachbau und Bauwerksabdichtung, Wien, Tagungsband.

- Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Feuchtetechnische Untersuchungen flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen*. OIB aktuell, Jg. 11, H. 3, S. 20–25.
- Teibinger, M.; Nusser, B. (2010): *Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen*. Holzforschung Austria, Wien, (Forschungsbericht. HFA-Nr.: P412).
- Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Do's and Dont's im Flachdachbau. Aus der Forschung in die Praxis - neue Forschungsergebnisse münden in Planungsbroschüre*. Holzbau - die neue quadriga, H. 1, S. 33–37.
- Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2009): *Flachdächer richtig ausgeführt. Do's and Dont's aus bauphysikalischer Sicht*. Holz\_Haus\_Tage, Fachtagung für innovative Holzhausbauer, 8.-9. Oktober, Mondsee, Tagungsband, S. 124–136.
- Teibinger, M.; Nusser, B. (2008): *Aktuelle Untersuchungen zum Feuchteschutz im Holzhausbau*. Wärme-, Sonnen- und Feuchteschutz im Holzbau, 40. SAH-Fortbildungskurs, Weinfeld, Tagungsband, S. 147–158.
- Nusser, B.; Neubauer, G.; Polleres, S. (2008): *Angewandte Bauforschung. Forschungsgebäude zu hygrothermischen Bauteiluntersuchungen unter Realbedingungen errichtet*. HFA-Magazin, Jg. 6, H. 1, S. 3–5.

*„Wenn man einen hohen Berg bestiegen hat, stellt man fest, dass es noch viele andere Berge zu besteigen gibt.“ (Nelson Mandela)*

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Feuchtehaushalt von flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen unter variierenden Einflussfaktoren experimentell und simulationsbasiert analysiert. Es werden ebenfalls neue wissenschaftliche Methoden entwickelt, welche es ermöglichen, im Planungsprozess schnell die geeignete Dachkonstruktion zu finden.

Im ersten Teil der Arbeit werden hierfür zehn verschiedene hölzerne Flachdachkonstruktionen im Realmaßstab untersucht.

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein statistisch begründeter Ansatz zur Berücksichtigung von konvektiven Feuchteinträgen in Dächer präsentiert. Des Weiteren wird ein Verfahren hergeleitet, durch welches spezifische Beschattungssituationen bei der Tauglichkeitsbeurteilung von hölzernen Flachdächern berücksichtigt werden können, ohne dass zusätzliche Simulationen der Beschattung notwendig werden.

Abschließend wird mit Hilfe eines Entscheidungsbaums aufgezeigt, wie die maßgebenden Faktoren auf die Dauerhaftigkeit von hölzernen Flachdächern bei der Planung praxistauglich berücksichtigt werden können.

ISBN 978-3-8396-0414-4



9 783839 604144